

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Frano Penava

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc.Dr.sc.Suzana Jakovljević, dipl. Ing

Student:

Frano Penava

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici dr.sc. Suzani Jakovljević na savjetima, interesu i trudu te poticajnoj radnoj atmosferi koja je značajno doprinjela pisanju ovoga rada.

Htio bih se zahvaliti dr.sc. Željku Alaru na savjetima, trudu i pomoći oko provedbe ispitivanja.

Zahvaljujem se Alexanderu Bergeru na savjetima i iznimnoj susretljivosti te pomoći oko nabavljanja uzoraka te izrade bicikla. Bez čije pomoći količina provedenih ispitivanja bi bila znatno manja.

Također, zahvaljujem se Božidaru Bušetinčanu, Romanu Divjaku i Matiji Sakomanu oko pomoći tijekom ispitivanja.

Zahvalio bih se obitelji, roditeljima i sestrama te djevojci Ireni na podršci i razumijevanju tijekom izrade rada, ali i tijekom studiranja.

Frano Penava



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Frano Penava**

Mat. br.: 0035174920

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **Primjena bambusa pri izradi bicikla**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **Application of bamboo in bicycle**

Opis zadatka:

Opis zadatka:

Prirodni materijali imaju obnovljiv izvor energije te je njihova primjena sve popularnija. Povećanjem svijesti o zaštiti okoliša i smanjenim resursima rude i nafte potiče se primjena prirodnih materijala. Bambus kao prirodni materijal nalazi svoju primjenu kao bio-gorivo, pri izradi namještaja, parketa, u građevini, kod vozila, itd


U ovom je radu potrebno:

1. Dati prikaz primjene prirodnih materijala.
2. Navesti vrste bambusa i njihove karakteristike.
3. Za dvije vrste bambusa, koji se primjenjuju kod izrade bicikla, ispitati njihova mehanička svojstva prema važećim normama prije i nakon izlaganja vlažnoj komori.
4. Komentirati dobivene rezultate te dati zaključak.

Zadatak zadan:

10. ožujka 2016.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Suzana Jakovljević

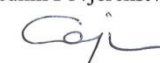
Rok predaje rada:

12. svibnja 2016.

Predviđeni datum obrane:

18., 19. i 20. svibnja 2016.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. PRIMJENA MATERIJALA KOD BIKIKLA	2
2.1. Izum i razvoj bicikla	2
2.2. Dijelovi bicikla	2
a) Okvir.....	2
b) Pogon.....	3
c) Sistem kočnja.....	4
d) Sistem upravljanja	5
2.3. Vrste bicikla.....	6
2.4. Konstruiranje i tehnologije izrade okvira bicikla	8
a) Konstruiranje	9
b) Tehnologija izrade okvira bicikla	11
2.5. Materijali okvira bicikla	12
a) Aluminiij.....	13
b) Čelik.....	14
c) Titan.....	15
d) Magnezij	16
e) Kompoziti s ugljičnim vlaknima	16
f) Drvo	17
g) Ostali materijali	18
3. BAMBUS.....	21

3.1.	Podjela bambusa	22
a)	Porodica Olyreae	23
b)	Porodica Arundinarieae	23
c)	Porodica Bambuseae.....	24
3.2.	Primjena bambusa.....	24
3.3.	Struktura bambusa	28
3.4.	Kemijski sastav	31
3.5.	Mehanička svojstva	32
a)	Modul elastičnosti.....	34
b)	Vlačna čvrstoća.....	35
c)	Tlačna čvrstoća	36
d)	Savojna čvrstoća	37
e)	Tvrdoća	38
f)	Gustoća	38
g)	Utjecaj vlage	39
3.6.	Vrste prikladne za izradu bicikla	39
4.	REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA	42
5.	DISKUSIJA REZULTATA.....	74
□	USPOREDBA S OSTALIM MATERIJALIMA	75
6.	IZRADA BIKIKLA	81
7.	ZAKLJUČAK	85
	LITERATURA.....	86

POPIS SLIKA

Slika 1. Okvir bicikla [7]	3
Slika 2. Pogon bicikla [8]	4
Slika 3. Kočnica [9]	5
Slika 4. Položaj tijela pri vožnji [12]	6
Slika 5. Teretni bicikli	7
Slika 6. Geometrija okvira [12]	9
Slika 7. Prikaz naprezanja [12]	10
Slika 8. Materijali za okvir bicikla [17]	13
Slika 9. Slika Bicikl s aluminijskim okvirom	14
Slika 10. Okvir od titanove legure [23]	16
Slika 11. Okvir od kompozita s ugljičnim vlaknima [25]	17
Slika 12. Vožnja na drvenim biciklima [26]	18
Slika 13. Bicikl od kartona tvrtke Cardboard Technologies [30]	19
Slika 14. Bambus bicikl [31]	20
Slika 15. Područja rasta bambusa u svijetu [37]	21
Slika 16. Bambus šuma u Japanu [34]	22
Slika 17. Bambus šuma u Kini [37]	22
Slika 18. Bambus iz porodice Arundinarieae- Fargesia rubusta [35]	23
Slika 19. Ograda od bambusa [38]	25
Slika 20. Primjena guadua bambusa u građevini [39]	28
Slika 21. Poprečni presjek stijenke Moso bambusa [1]	29
Slika 22. Prikaz strukture grupiranog bambusa [41]	30
Slika 23. Prikaz bambusa strukture bambusa trkača [42]	30
Slika 24. Kemijski sastav bambusa [43]	31
Slika 25. Tonkinov bambus	40
Slika 26. Ku Zhu (gorki) bambus [61]	41
Slika 27. Bambus cijevi	42
Slika 28. Kidalica EU 40 MOD	45
Slika 29. Uzorci spremni za ispitivanje	46
Slika 30. Dimenzije uzorka	46
Slika 31. Statičko vlačno ispitivanje uzorka 2 – 5 Tonkin bambus	47
Slika 32. Statičko vlačno ispitivanje uzorka 18 – 3 Ku Zhu bambus	47

Slika 33.	Dimenzije uzorka ispitivanog na tlačno opterećenje	49
Slika 34.	1-5 Uzorak Tonkinovog bambusa ispitan na tlačno opterećenje	49
Slika 35.	18-T-5 Uzorak Ku Zhu bambusa ispitan na tlačno opterećenje.....	50
Slika 36.	Tlačno opterećen uzorak 1-5.....	51
Slika 37.	Metoda ispitivanja savojne čvrstoće	52
Slika 38.	Savijanje uzorka 13-1	53
Slika 39.	Lom uslijed savijanja uzorak 25-3	54
Slika 40.	Lom uslijed savijanja uzorak 13-2	54
Slika 41.	Ispitivanje uzorka 5	55
Slika 42.	Izvijanje uzorka 5.....	56
Slika 43.	Ispitivanje tvdoće bambusa.....	56
Slika 44.	Grafički prikaz rezultata Tonkinovog bambusa.....	58
Slika 45.	Grafički prikaz rezultata Ku Zhu bambusa	59
Slika 46.	Emitech uređaj	60
Slika 47.	Prikaz prijeloma uzorka 2-1 a) krhki i žilavi lom; b) prikaz stanica parenhima...	60
Slika 48.	Uvećani prikaz prijeloma uzorka 2-1 a) oštećenje vaskularnog snopa; b) oštećenje parenhima i vlakana	61
Slika 49.	Prikaz prijeloma uzorka 18-2 a) krhki i žilavi lom; b) prikaz vaskularnog snopa	62
Slika 50.	Uvećan prikaz prijeloma uzorka 18-2 a) oštećenje parenhima i vlakana; b) oštećenje vaskularnog snopa.....	62
Slika 51.	Vagaje uzoraka.....	64
Slika 52.	Uzorci u vlažnoj komori	64
Slika 53.	Vlačno opterećeni uzorak.....	66
Slika 54.	Dijagram uzorka 1-A-4	66
Slika 55.	Dijagram uzorka 22-B-3	67
Slika 56.	Dijagram uzorka 1-A-3T.....	69
Slika 57.	Uzorak 1-A-3T.....	69
Slika 58.	Dijagram za uzorak 3-A-1.....	71
Slika 59.	Uzorak opterećen na savijanje	71
Slika 60.	Lom uzorka 3-A-2.....	73
Slika 61.	Skica okvira	81
Slika 62.	Postavljanje cijevi na napravu	82
Slika 63.	Lijepljenje spojeva	82
Slika 64.	Nanošenje trake na kompozit s ugljičnim vlaknima	83

Slika 65. Okvir od bambusa	83
Slika 66. Nanošenje zaštitnog sloja na okvir.....	84
Slika 67. Izrađeni okvir od bambusa i ugljičnih vlakana	84

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz primjene bambusa [37]	26
Tablica 2. Dosadašnji rad.....	33
Tablica 3. Dimenzije cijevi tonkinovog bambusa.....	43
Tablica 4. Dimenzije cijevi gorkog bambus	44
Tablica 5. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za Tonkin bambus.....	48
Tablica 6. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za Ku Zhu bambus	48
Tablica 7. Rezultati statičkog tlačnog ispitivanja za Tonkinov bambus.....	50
Tablica 8. Rezultati statičkog tlačnog ispitivanja za Ku Zhu bambus	51
Tablica 9. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće Tonkin bambusa	53
Tablica 10. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće Ku Zhu bambusa	53
Tablica 11. Rezultati ispitivanja na izvijanje	55
Tablica 12. Rezultati ispitivanja tvrdoće Tonkinovog bambusa	57
Tablica 13. Rezultati ispitivanja tvrdoće Ku Zhu bambusa	58
Tablica 14. Promjena mase uzoraka Tonkin bambusa.....	64
Tablica 15. Promjena mase uzoraka Ku Zhu bambusa.....	65
Tablica 16. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće Tonkin bambusa nakon vlažne komore.....	67
Tablica 17. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće Ku Zhu bambusa nakon vlažne komore.....	68
Tablica 18. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće Tonkinovog bambusa nakon vlažne komore	69
Tablica 19. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće Ku Zhu bambusa nakon vlažne komore.....	70
Tablica 20. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće Tonkin bambusa nakon vlažne komore.....	72
Tablica 21. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće Ku Zhu bambusa nakon vlažne komore	72
Tablica 22. Usporedba provedenih rezultata	74
Tablica 23. Usporedba vlačne čvrstoće materijala	75
Tablica 24. Usporedba tlačne čvrstoće materijala	76
Tablica 25. Usporedba savojne čvrstoće materijala.....	77
Tablica 26. Usporedba naprezanja izvijanja materijala	78
Tablica 27. Usporedba tvrdoće materijala	78
Tablica 28. Usporedba gustoće materijala	79
Tablica 29. Usporedba specifične vlačne čvrstoće materijala	79

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
l	mm	Duljina uzorka
a_0	mm	Debljina presjeka uzorka
b_0	mm	Širina presjeka uzorka
S_0	mm ²	Površina presjeka uzorka
F_m	N	Maksimalna sila
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
F_k	N	Sila izvijanja
v	mm/min	Brzina opterećenja
d_1	mm	Vanjski promjer uzorka
d_2	mm	Unutarnji promjer uzorka
σ_t	N/mm ²	Tlačna čvrstoća
L	mm	Razmak između oslonaca
σ_s	N/mm ²	Savojna čvrstoća
M	Nmm	Moment
y	mm	Udaljenost centra uzorka do površine djelovanja sile
I	mm ⁴	Polarni moment inercije
r_0	mm	Vanjski radijus uzorka
r_i	mm	Unutarnji radijus uzorka
A	Mm ²	Površina presjeka
σ_k	N/mm ²	Naprezanje izvijanja
Hk	N/mm ²	Tvrdoća
D	mm	Promjer metalne kuglice
F	N	Sila utiskivanja
h	mm	Dubina utiskivanja
k	-	korekcija
$w(\text{H}_2\text{O})$	-	Maseni udio akumulirane vlage
m	g	Masa uzorka
ρ	kg/m ³	Gustoća materijala

SAŽETAK

U modernom svijetu sve više se razvija se briga o okolišu. Pretjerana emisija CO₂ u atmosferu te nekontrolirana potrošnja neobnovljivih fosilnih goriva doveli su do neodrživosti sustava. Potreba za održivim rješenjima sve je veća, osobito u sektoru prometa. Bicikl se nameće kao najjeftinije i ekološki najprihvatljivije prijevozno sredstvo.

U ovo radu je opisana primjena materijala kod bicikla. Definirana je struktura i podjela bambusa te su analizirane dvije vrste bambusa (Tonkin bambus i Ku Zhu bambus) skenirajućim elektronskim mikroskopom. Ispitana su mehanička svojstva bambusa koja su uspoređena s ostalim materijalima koji se primjenjuju za izradu okvira bicikla. Svrha ovog rada je prikupiti više znanja o bambusu i dokazati da je moguće primjeniti bambus za izradu okvira bicikla.

Ključne riječi: bambus, mehanička svojstva, bicikl, vlažna komora

SUMMARY

In modern world concern for environment is increasing. Excessive CO₂ emission and uncontrolled consumption of non renewable fossil fuels have led to unsustainable system. The need for sustainable solutions is increasing especially in the transport sector. The bicycle is imposing itself as the cheapest and environmentally friendly vehicle.

In this paper, application of materials on bicycles are described. Structure and classification of bamboo is explained and two species of bamboo (Tonkin Cane and Bitter bamboo) are analysed with scanning electron microscope. Mechanical properties of bamboo were tested and compared with traditional materials used for bicycle frame to determine their suitability for designing a frame. The purpose of this study was to gain more knowledge on bamboo and prove his suitability in use as an alternative material for bicycle frame.

Key words: bamboo, mechanical properties, bicycle, moist chamber

1. UVOD

U suvremenom svijetu razvila se svijest o ekologiji. Zagađena industrija, emisija CO₂ u atmosferu, ograničenost fosilnih goriva naveli su na zaključak da je takav sustav neodrživ. Alternativna rješenja su potrebna, razvijaju se ekološki prihvatljivije tehnologije, usmjerava se na smanjenje potrošnje energenata i očuvanje prirode. U današnjem svijetu gdje prevladava ubrzani ritam života, populacija eksplicitno raste pa se svakodnevno povećava potreba za upotrebom prijevoznih sredstava. [1]

Bicikl je najjeftinije i ekološki najprihvatljivije prijevozno sredstvo. Također je i napristupačniji, najbrži i najzdraviji oblik prijevoza. Stoga, nije čudno što popularnost bicikla raste. Prema podacima [2] u Europskoj Uniji prodaja bicikla porasla je u 2015. godinu u odnosu na 2014. za 9,6 %. Ekološka svijest u Europskoj Uniji raste, tako je na primjer 2014. prodano 4,1 milijun bicikla te je ostvaren profit prodajom bicikla i dijelova oko 4 do 5 milijardi eura. Više od 70 000 ljudi je zaposleno u biciklističkoj industriji u EU koja je jedna od ekološki najprihvatljivijih industrija u Europi. Stoga, mnogi znanstvenici i inženjeri rade na razvoju ekološki prihvatljivijih materijala, posebno se fokusiraju na prirodne materijale. Posebno zanimljivo kod prirodnih materijala je obnovljivost sirovine. Povećao se razvoj prirodnih materijala kako bi zamijenili skuplje i ekološki neprihvatljive materijale. Tako se u industriji vozila razvijaju materijali koji bi smanjili zagađenje tijekom proizvodnje proizvoda, tijekom uporabe i odlaganja proizvoda.

2. PRIMJENA MATERIJALA KOD BIKIKLA

2.1. Izum i razvoj bicikla

Prema definiciji bicikl je vozilo koje ima najmanje dva kotača i koje se pokreće isključivo snagom vozača. Prvi bicikl „laufmaschine“ izumio je Carl Friedrich Drais zu Sauerbronn 1817. godine kao zamjenu za konja. Taj tada novi izum nametnuo se kao dobro i efikasno rješenje za prijevoz na kraćim relacijama. Godine 1861. pariški je kovač Micheaux ugradio prve pedale. Prednji kotač postaje veći te je taj bicikl bio iznimno neudoban, zbog toga je i nazvan „boneshaker“ (kostotresac). 1870. godine James Starley izrađuje prvi bicikl s prijenosnim mehanizmom i velikim prednjim kotačem što je povećalo udobnost, ali smanjilo sigurnost posebno na nizbrdicama. 1879. godine nastaje prvi moderni bicikl, kakav nam je i danas poznat. 1888. godine John Boys Dunlop razvija pneumatik za tricikl svog sina što je značajno povećalo udobnost bicikla. 1935. godine pojavljuju se prvi aluminijski obruči, dok su 1937. prvi put korišteni mjenjači. 1973. na tržištu se pojavljuje Shimano s prvom generacijom grupe Dura Ace. 1975. godine konstruiran je prvi „oversize“ bicikl, zatim se te iste godine pojavljuju prvi bicikli od kompozita ugljičnih vlakana. 1986. godine izrađen je prvi okvir od kompozita s ugljičnim vlaknima bez potrebe dodatnog spajanja (eng. *Carbon Monocoque*). 2009. godine je Shimano predstavio svoju elektronski mjenjački sustav Dura Ace Di2 [3,4]. Razvoj bicikla kontinuirano raste. Postoje razni oblici i veličine bicikla, ali većina tipova konvencionalnih okvira bicikla imaju iste osnovne elemente. Osim razvoja geometrije okvira, razvijali su se dijelovi bicikla te izbor materijala dijelova i okvira bicikla.

2.2. Dijelovi bicikla

Glavni dijelovi bicikla su [4,5] :

- Okvir
- Pogon
- Sistem kočenja
- Sistem upravljanja

a) Okvir

Okvir je najvažniji dio bicikla. Najčešće korišten tip okvira bicikla je dijamantnog oblika s dva spojena trokuta. Ovaj tip okvira je poznat i pod nazivom sigurnosni okvir (eng. *safety frame*).

Osnovni dijelovi sigurnosnog okvira su gornja cijev (eng. *top tube*), cijev volana (eng. *head tube*), donja cijev (eng. *down tube*), cijev sjedala (eng. *seat tube*), šupljina pogonske osovine (eng. *bottom bracket shell*), upornji sjedala (eng. *seat stays*), upornji lanca (eng. *chainstays*), nosači kotača (eng. *dropout*) [4,5].

Gornja cijev proteže se od spoja ispod sjedala do volana, cijev volana je mala cijev kroz se spajaju vilica i volan, donja cijev proteže se od šupljina pogonske osovine do cijevi volana. Cijev sjedala proteže se od šupljina pogonske osovine prema sjedalu. Šupljina pogonske osovine povezuje donju cijev, cijev sjedala i upornji lanca. Upornji lanca povezuju nosači kotača i šupljinu pogonske osovine. Upornji sjedala povezuju cijev sjedala i nosač kotača dok nosač kotača povezuje upornje lanca i upornje sjedala. [6]

Geometrija okvira je definirana kutovima između cijevi i njihovim duljinama. Mijenjanjem duljina cijevi i kutova među cijevima mijenja se ponašanje bicikla, kao i prilagođenost konstrukcije bicikla za vozača. Na slici 1 nalazi se okvir bicikla.

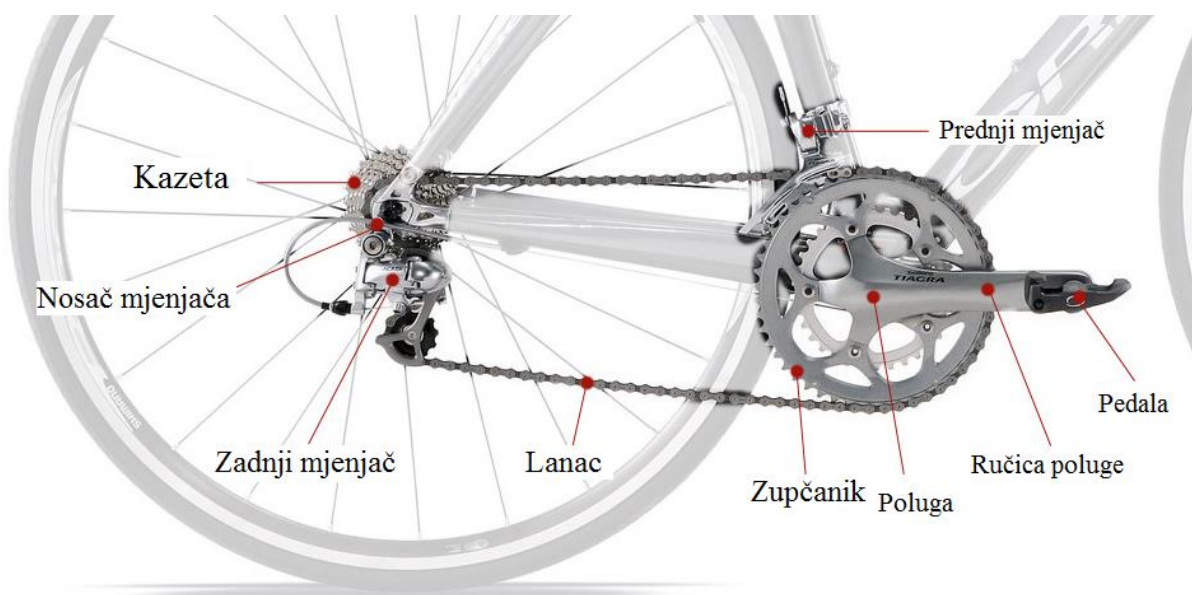


Slika 1. Okvir bicikla [7]

b) Pogon

Pogon ili prijenos je skupina komponenti pedala, poluga, zupčanika, lanca, mjenjača, ručica mjenjača, žbica i kotača čija je funkcija prenijeti uloženu energiju vozača na pogonski kotač [slika 2]. Princip rada pogonskog sistema je mehanički. Vozač djeluje tlačno na pedale (okreće pedale), sila se prenosi preko poluga koje djeluju kao krak te se stvara moment na

osovinu pogona. Sustavom zupčanika i lanca moment se prenosi na pogonski kotač. Uloga prednjeg i zadnjeg mjenjača je pomicanje lanaca po zupčanicima tj. mijenjanje brzina, što rezultira različitim opterećenjem pedaliranja. Većina sistema mijenjanja brzina temelji se na mehaničkom pritisku ručice na volanu gdje dolazi do zatezanja čeličnog užeta što rezultira pomicanje prednjeg ili zadnjeg mjenjača u lijevo odnosno desno [4,5].

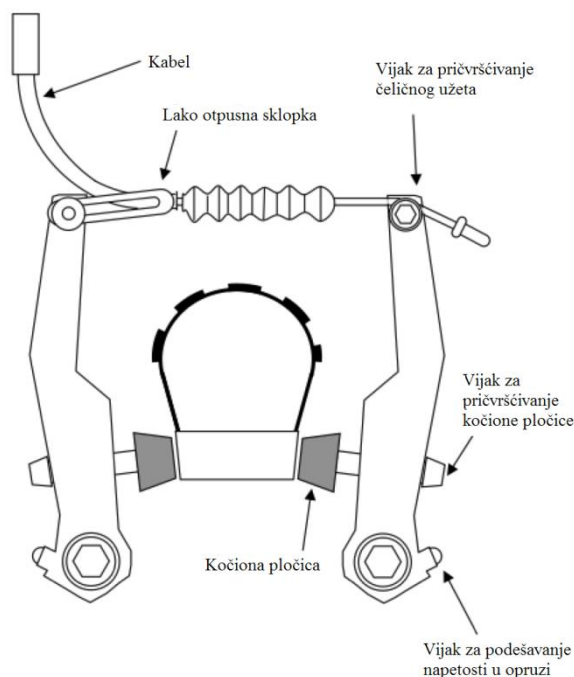


Slika 2. Pogon bicikla [8]

c) Sistem kočenja

Za potpunu funkcionalnost bicikla potrebno je misliti na sigurnost vozača. Stoga je razvijen sistem kočenja koji omogućuje naglo i učinkovito zaustavljanje. Većina bicikla opremljena je s dvije kočnice, prednje i zadnje. Prednje kočnice su pričvršćene za vilicu, dok je zadnja kočnica pričvršćena za upornje sjedala. Svrha kočnica je zaustavljanje okretanja kotača te na taj način zaustavi kretanje bicikla. Kočnica je spojena pomoću kabela sa ručicom kočnice koja se nalazi na volanu. Pritiskom na ručicu dolazi reakcije gdje se mehaničkim ili hidrauličkim putem čeljusti kočnice spajaju te se stvara sila trenja koja zaustavlja bicikl. Postoji mnogo tipova kočnica, najčešće korištene su kočnice koje djeluju trenjem na obruč kotača tzv. „V brake“ prikazane na slici 3. Sve više raste popularnost disk kočnica kod kojih kočione pločice pritišću metalni disk koji je pričvršćen za glavčinu. Disk kočnice pokazuju bolja svojstva kočenja u različitim vremenskim uvjetima. Međutim, većina cestovnih bicikla i

dalje koristi kaliper kočnice koje obuhvate cijeli obruč te pritiskom na ručicu, na volanu, pritisnu obruč. Kaliper kočnice su relativno lagane i jednostavne za montažu. Ovaj tip kočnica je vrlo efikasan pri kočenju i jedini joj je nedostatak mala sposobnost odvođena topline pri intenzivnom kočenju [4,5,6].



Slika 3. Kočnica [9]

d) Sistem upravljanja

Sistem upravljanja se sastoji od volana, lule bicikla, seta ležaja volana i vilice. Upravljanje je jedan od ključnih elemenata za korištenje bicikla. Pomoću volana se mijenja smjer kretanja, ali i zadržava postojeći smjer. Volan je povezan s vilicom preko lule volana. Volan i lula bicikla značajno utječu na udobnost vožnje. Duljinom lule definira se upravljivost i prilagođenost veličine bicikla. Vilica je pričvršćena za prednji kotač koji se okreće sukladno okretanju volana. Iako je kut zakretanja volana velik (360°) pri vožnji uglavnom ne prelazi 5° . Osim navedene funkcije vilice, posljednjih nekoliko desetljeća popularne su vilice sa suspenzijom koje olakšavaju vožnju, tj. amortiziraju udarce i neravan teren [3,4,5,6].

2.3. Vrste bicikla

Postoji mnogo tipova bicikla kao što su cestovni bicikl, brdski bicikl (eng. *MTB – mountain bike*), hibridi, gradski bicikl, bicikl s jednom brzinom te fiksim mjenjačem, zatim turing i treking bicikl, tandem bicikl, sklopivi bicikl, teretni bicikl, tricikl, elekčni bicikl, bmx bicikli itd. Bicikl kao vozilo ima više namjena te se osim za privatne i poslovne svrhe koristi i za sportski biciklizam.

Cestovni bicikli su osmišljeni za utrke, iako su popularni izbor i za svakodnevnu vožnju. Popularnost mogu zahvaliti svojoj aerodinamičnoj konstrukciji i maloj masi (uobičajeno manja od 11 kg) [4]. Tradicionalni cestovni bicikli izrađuju se od čelika dok u novije vrijeme sve su popularnije kompozitne rame od preprega ugljičnih vlakna [4,5,11].

Brdski bicikli su konstruirani za brdsku vožnju po planinama. Karakteristika brdskih bicikli su široke gume, ravan volan, mnogo brzina i suspenzija vilice. Suspenzije se mogu nalaziti na prednjoj vilici i/ili na upornjima sjedala koje ublažavaju neočekivane udarce.

Hibridi, gradski bicikl i udobni bicikli su varijacije nastale na osnovi brdskog bicikla, kod kojih se koristeći tanje gume postiže manje trenje u odnosu na podlogu. Kod ovakvih tipova bicikla položaj tijela vozača je uspravniji i udobniji. Ovakvi tipovi bicikla često imaju blatobrane, nosače tereta, štitnike lanca, svijetla, itd. Stilovi vožnje prikazani na slici 4 [4,5,11]



Slika 4.

Položaj tijela pri vožnji [12]

Turing bicikl su konstruirani za dugotrajnu uporabu i udobnost uz povećanu otpornost na opterećenje. Nalikuje na cestovni bicikl s elementima brdskih bicikla tj. ima robusniji okvir s širim gumama. Također, i ovakvi tipovi bicikla često imaju blatobrane, nosače tereta, štitnike lanca, svijetla, itd. Treking bicikl nalikuje na brdski bicikl s elementima cestovnog. Imaju sličnu svrhu kao i turing bicikli, namjenjen je za dugotrajne vožnje po šumskim putevima.

Sklopivi bicikli uglavnom nisu namjenjeni za veće udaljenost zbog svojih manjih kotača. Specifično za ove bicikle je mogućnost sklapanja što omogućuje lakše skladištenje te prijevoz bicikla.

Tandem bicikl je konstruiran za više osoba, a najmanje dvije. Postoje razni tipovi ovih bicikla, ali najučestaliji su kada se vozači nalaze jedan iza drugoga.

Teretni bicikl [slika 5] su novitet u svijetu bicikla. Postoje razni tipovi teretnih bicikla s teretnim prostorom ispred volana, iza volana, s tri kotača, s dva kotača, produljeni, kratki, itd. Osnovna svrha im je efikasan i ekonomičan prijevoz tereta, ali i osoba. Sve više se u svijetu prepoznaju teretni bicikli kao ekološki prihvatljivo rješenje za prijevoz. [3, 4,5,11]



Slika 5.

Teretni bicikli

Električni bicikli su bicikli čiji se kretanje po definiciji ostvaruje okretanjem pedala i elektromotorom spojenim na bateriju. Međunarodni naziv za ovakva vozila je „pedelec“.

Zakonski ograničena snaga elektromotora je 250 W pri čemu ovakvi bicikli nebi trebali postizati brzinu veću od 25 km/h.

Tricikl su najčešće u ponudi s dva stražnja kotača i jednim prednjim.

BMX bicikl napravljeni za izvođenje trikova, akrobacija te utrke na zemlji. Bili su popularni 80-tih i 90-tih godina. [3,4,5,11]

2.4. Konstruiranje i tehnologije izrade okvira bicikla

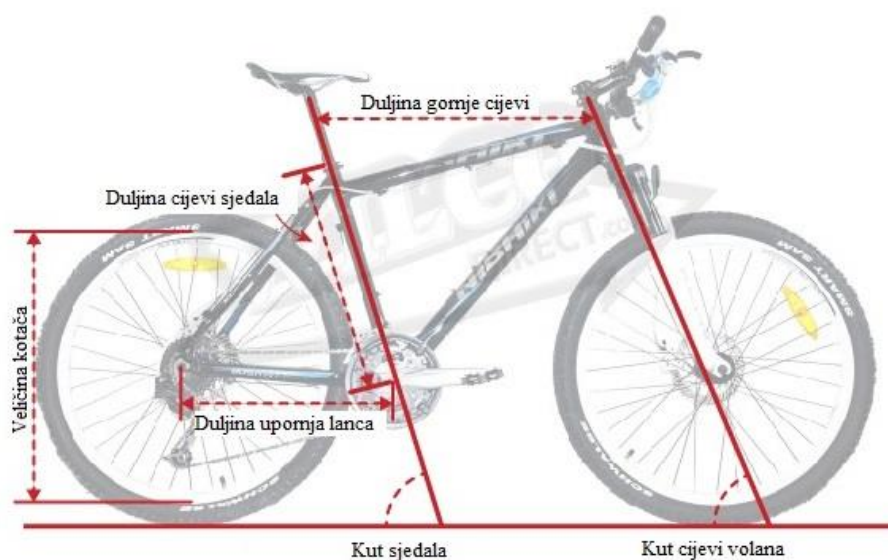
Proces izrade bicikla počinje nakon konstruiranja geometrije bicikla. Proces konstruiranja i izrade bicikla su ključni faktori kojima se određuje funkcionalnost bicikla. Stoga pri konstruiranju i izradi potrebno je uzeti u obzir sljedeće elemente:

- Čvrstoća
- Izdržljivost
- Aerodinamičnost
- Masa
- Veličina
- Stabilnost
- Učinkovitost
- Cijena
- Udobnost

Svaki od navedenih elemenata je jednako bitan, no kod nekih primjena pojedini elementi imaju prednost nad ostalim elementima (npr. kod sportskog biciklizma – ostali elementi imaju prednost nad cijenom) [4,5].

a) Konstruiranje

Pri samom konstruiranju okvira bicikla treba uzeti u obzir mnogo čimbenika koji utječu na odabir duljine cijevi te kutova između cijevi okvira. Odabir kutova između cijevi utječe na stabilnost, aerodinamiku, veličinu, udobnost i učinkovitost okvira [slika 6]. Uobičajeni kut cijevi volana i cijevi sjedala u odnosu na pod je 74° . Međutim, kut se može mijenjati ovisno o veličini okvira. Kut cijevi sjedala utječe na udobnost i učinkovitost vožnje. Smanjenjem kuta povećava se udobnost vožnje, dok povećanjem kuta do 90° povećava se učinkovitost vožnje te se okvir s kutem cijevi sjedala 90° smatra „agresivnijim“. Razlog zašto je okvir s kutem 90° agresivniji je položaj vozača iznad pedala koji mu omogućuje da djeluje većom silom na pedale te proizvodi veću snagu. Kut cijevi volana utječe na udobnost i okretnost sistema upravljanja. Sa smanjenjem kuta povećava se udobnost vožnje, dok s povećanjem kuta povećava se okretnost volana, a smanjuje se udobnost. Osim kuteva na udobnost okvira utječe i duljina upornja lanca, s porastom duljine okvir je stabilniji uz smanjenje okretности. Za prijevoz tereta veće mase, posebno na stražnjem dijelu bicikla, i korištenje blatobrana prikladniji su duži upornji lanca. [3,4,5,6]

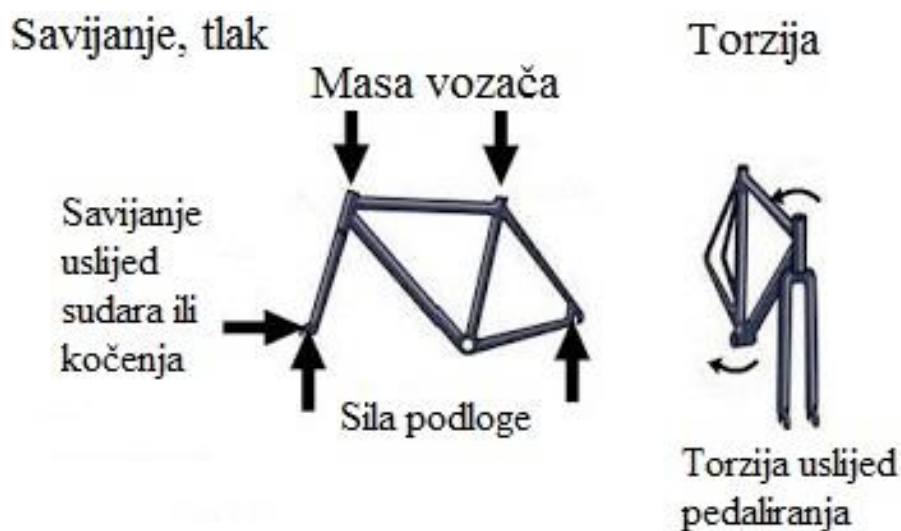


Slika 6. Geometrija okvira [12]

Osim klasičnih okvira bicikli postoje razne izvedbe okvira koje su se razvijale tijekom godina, kao što su okviri namijenjeni za žene, okviri namijenjeni za specifičnu upotrebu i sl. Iako su kutovi među cijevima i dužine cijevi drugačiji od uobičajenog „muškog“ okvira, dužine cijevi i kutovi određuju se istom metodom.

Kako bi konstrukcija bila dobro dimenzionirana potrebno je prepoznati moguća naprezanja pri korištenju bicikla. U stacionarnim uvjetima tj. bez kretanja bicikla, vozač svojom masom radi opterećenje na cijev sjedala i volana dok podloga djeluje suprotnom silom jednakog iznosa. U dinamičkim uvjetima tj. tijekom vožnje dolazi do pojave torzije uslijed pedaliranja te savijanja uslijed kočenja ili sudara. Osim kočenja, upravljanje i vibracije uzrokuju pojavu promjenjivih sila koje okvir mora apsorbirati. Zbog djelovanja sila i momenta dolazi do naprezanja. Dolazi do tlačnog naprezanja u cijevi sjedala, gornjoj cijevi, cijevi volana i potpornjima sjedala dok se vlačno naprezanje pojavljuje u donjoj cijevi i potpornjima lanca prikazano na slici 7.

Okvir se mora konstruirati tako da izdrži djelovanja ovih sila i momenata. Međutim, izazov je konstruirati okvir s optimalnim mehaničkim svojstvima i što manjom masom. S obzirom da je trend u industriji bicikla smanjenje mase, koriste se tanje debljine stijenke cijevi. Smanjenje debljine stijenke cijevi uzrokuje pad mehaničkih svojstava što može rezultirati lomovima uslijed djelovanja asimetričnih i promjenjivih sila koje se često zanemaruju pri konstruiranju. Stoga se u posljednje vrijeme posebno pridaje pažnja tim silama. Optimalan okvir bicikla trebao bi biti dovoljno fleksibilan zbog prigušenja vibracija, ali i dovoljno krut. Krutost se osigurava korištenjem cijevi većeg promjera, dok primjenom tanjih stijenki cijevi učinkovito se smanjuje masa. Također, na krutost utječu, i duljina i promjer cijevi volana. S povećanjem cijevi volana, upravljanje je stabilnije dok se povećanjem promjera cijevi volana povećava i krutost.



Slika 7.

Prikaz naprezanja [12]

Sníženje mase nije jedini izazov pri konstruiranju, udobnost pri vožnji je vrlo bitan element. S obzirom da biciklisti provode i do nekoliko sati dnevno biciklirajući, položaj tijela, ruku i nogu je ključan da bi biciklist imao dobru kontrolu i udobnost pri vožnji. Udaljenost šupljine pogonske osovine od podloge utječe na udobnost (što je bliže podlozi veća je udobnost vožnje). Međutim, treba biti dovoljno visoko da pedale ne dodiruju podlogu (u Njemačkoj postoje norme koje definiraju minimalnu udaljenost od podloge). Duljina gornje cijevi određuje se prema dužini torza i ruku vozača, promjena u duljini utječe na upravljivost bicikla [3,4,5,6,13].

b) Tehnologija izrade okvira bicikla

Postupak izrade okvira bicikla se razlikuje ovisno o vrsti materijala. Najčešće se proizvode okviri od čelika, aluminijskih legura, ugljičnih vlakana te titanovih legura. Za okvire od čelika, aluminijskih i titanovih legura proces počinje preradom sirovine u cijevi. Zatim se cijevi savijaju i režu na definirane dimenzije. Nakon što je materijal pripremljen, cijevi se postavljaju u napravu na kojoj se određuje geometrija okvira. Slijedeći korak izrade je spajanje cijevi spojnicom, zavarivanjem i/ili zadebljanjem cijevi.

Čelični okvir se može proizvesti na nekoliko načina: spajanjem spojnica (eng. *lugged frame*), zavarivanjem (eng. *welded frame*) i sa zadebljanim cijevima (eng. *butted frame*).

Spajanje sa spojnicama je stari način izrade okvira gdje se cijevi umeću u spojnice zatim se spojevi zagrijavaju i provodi se lemljenje spojeva. Temperature lemljenja nisu visoke kao kod zavarivanja stoga je moguća upotreba tanjih stijenki cijevi. Spojnice dodaju masu okviru, ali i specifičan izgled. Cijevi unutar spojnica su dovoljno fleksibilne da priguše vibracije nastale uslijed vožnje, a ujedno omogućuju lakšu zamjenu cijevi bez rezanja okvira.

Okviri od titanovih i aluminijskih legura mogu se proizvesti zavarivanjem te sa zadebljanim cijevima.

Zavarivanjem se proizvode aluminijski, čelični i titanovi okviri. Cijevi se spajaju taljenjem materijala cijevi zajedno s dodatnim materijalom. Najčešće se koristi TIG (eng. *Tungsten inert gas*) postupak zavarivanja. Ponekad se spajaju MIG (eng. *Machine inert gas*) postupkom zavarivanja, ovaj postupak koristi se za jeftiniju tehnologiju izrade s obzirom da je potrebno uložiti manje rada kako bi se okvir proizveo. Zbog povećanog unosa topline, cijevi moraju biti deblje, no nema spojnica što smanjuje masu.

Postupak izrade zadebljanim cijevima (eng. *butted frame*) smanjuje masu okvira zbog nejednake debljine stijenke. Postiže se smanjena debljine stijenke na sredini cijevi dok je veće zadebljanje pri spojevima kako nebi došlo do zaostalih naprezanja nakon zavarivanja. Okviri izrađeni ovim načinom su skuplji, ali maju manju masu. Zadebljanja cijevi se dodaju kako bi se povisila čvrstoća gdje je potrebno te da bi pri zavarivanju i/ili lemljenju nebi došlo do zaostalih naprezanja. Ovaj način izrade najčešće se primjenjuje kod izrade čeličnih i titanovih okvira.

Okvir od ugljičnih vlakana može se izraditi na dva načina:

- spajajući cijevi od ugljičnih vlakana na spojevima
- izrađeno od jednog komada (eng. *monocoque*)

Proces izrade spajanja cijevi od ugljičnih vlakana sličan je izradi metalnih okvira. Od sirovine se izrade cijevi koje se zatim stavljaju na napravu na kojoj se određuje geometrija okvira. Cijevi se spajaju namotavanjem preprega ili trake ugljičnih vlakana umočenih u smolu zatim se toplinski tretira kako bi se stvorio bolji spoj. Ova metoda je fleksibilnija i mogu se postići okviri s jako malom masom.

Kod procesa izrade okvira od jednog komada prepreg se slaže u kalup zatim se zagrijava na visokim temperaturama kako bi se otopila smola dok visoki tlak izvlači zrak iz materijala što povećava mehanička svojstva. Nakon hlađenja potpornji lanca i sjedala se spajaju s glavnim trokutom. Ova metoda je ujedno i najčešća metoda izrade okvira od ugljičnih vlakana. [4,5,11,19]

2.5. Materijali okvira bicikla

Bicikl se izrađuje od raznih materijala [slika 8]. Manji dijelovi su pretežno metalni zbog čvrstoće i trajnosti. Osim metalnih dijelova primjenjuju se polimeri, kompoziti i drvo. Za izradu okvira bicikla primjenjuju se razni materijali: od prirodnih materijala kao što su drvo ili bambus do metala i kompozita. Materijali se razlikuju po svojstvima, cijeni, ali i tehnologiji izrade. Stoga izbor materijala za okvir bicikla definira mehanička svojstva, trajnost, funkcionalnost, udobnost, masu, cijenu i tehnologiju izrade bicikla. Izbor materijala razvija se sukladno s razvojem geometrije bicikla, kako su se razvijali materijali tako su se razvijali bicikli. Kako bi se odredio materijal za izradu okvira bicikla potrebno je definirati bitna

svojstva kao što su vlačna čvrstoća, tlačna čvrstoća, krutost, dinamička izdržljivost, istezanje, gustoća, cijena i tehnoložnost. [4,17,18]



Slika 8. Materijali za okvir bicikla [17]

a) Aluminij

Čisti aluminij se rijetko koristi jer je mekan stoga se legira s manjim udjelom bakra, mangana, magnezija, silicija i cinka. Legiranje značajno poboljšava mehanička svojstva i omogućuje dugotrajniju primjenu.

Aluminijske legure imaju dobru specifičnu čvrstoću. Označavaju se s četiri broja koja definiraju legirne elemente te njihove udjele. Oznaka legure 1XXX označava čisti aluminij, 2XXX sadrži bakar, 3XXX sadrži mangan, 4XXX sadrži silicij, 5XXX sadrži magnezij, 6XXX sadrži magnezij i silicij te 7XXX sadrži cink. Svaki od ovih legura imaju drugačija svojstva, tehnoložnost i cijenu. Najčešće se primjenjuje legure serije 6XXX i 7XXX posebno 6061 (vlačna čvrstoća $140-320 \text{ N/mm}^2$ [17]), dok u novije vrijeme 7005 zbog viših mehaničkih svojstava (vlačna čvrstoća 350 N/mm^2 [17]). Aluminijske legure imaju manju čvrstoću i gustoću nego čelični okviri, no i dalje imaju visoku krutost. Legirni elementi osim što utječu na mehanička svojstva, utječu i na zavarljivost i obradivost materijala. Ovi okviri su prilično otporni na udarce, ali se teško popravljaju uslijed oštećenja. S obzirom da su aluminijske legure krhke od ostalih materijala, koji se primjenjuju za okvir bicikla, potrebna je deblja stijenka cijevi je ili veći promjer cijevi. Najprikladnija legura je 7075 zbog svoje visoke čvrstoće i dobre zavarljivosti. [16,17,18,19,20,21]

Aluminij se oblikuje metalnim utiskivanjem, dubokim izvlačenjem, kovanjem, savijanjem, lijevanjem i ekstruzijom. Spajanje aluminija provodi se mehanički, zavarivanjem MIG (eng. *machine inert gas*) i TIG (eng. *tungsten inert gas*) postupcima, rijeđe laserskim zavarivanjem.

Prednost primjene aluminija je stvaranje zaštitnog oksidnog sloja na površini pa ne dolazi do pojave korozije. Nedostatak je skupa proizvodnja.

Primjena aluminijskih legura popularna je kod brdskih [slika 9], treking i touring bicikla, ali se koristi i za proizvodnju povoljnijih cestovnih bicikla. [16,17,18,19,20,21]



Slika 9.

Slika Bicikl s aluminijskim okvirom

b) Čelik

Čelici su najkorištenija i najvažnija metalna legura. Zbog svojih odličnih mehaničkih svojstava i niske cijene nezaobilazan je pri proizvodnji bicikla. Mogu se podijeliti u 4 osnovne skupine : ugljični čelici, nehrđajući čelici, nisko legirani čelici i alatni čelici. [20,21,22]

Ugljični čelici mogu imati niski, srednji ili visoki udio ugljika. Duktilan, ali i krhak čelik dobije se s visokim udjelom ugljika. Visoko ugljični čelici podložni su koroziji i oksidaciji, stoga je nužna zaštita materijala. Srednje ugljični čelik ima povoljan udio ugljika i ostalih legiranih elemenata. Lako oblikovljiv, kovak i duktilan čelik dobije se s niskim udjelom ugljika. Ovakvi čelici su tvrdi, otporni na trošenje uz nižu žilavost.

Niskolegirani čelici sastoje se od željeza, ugljika i do 10 % ostalih legiranih elemenata, kao što su krom, molibden i nikal. Uloga legiranih elemenata je poboljšanje određenih svojstava. Ovi čelici imaju visoku čvrstoću te često se koriste za izradu lokota za bicikle.

Čelici se mogu obrađivati na mnogo način, kao što su lijevanje, ekstrudiranje, štampanje, duboko vučenje, kovanje, prešanje, savijanje, itd. Spajanje čelika vrši se mehanički (vijci,

zakovice), zavarivanjem (plinski, elektrolučno, MIG, MAG, TIG), zavarivanjem laserom i plazmom te lijepljenjem. Kao završna obrada nanosi se zaštitni sloj ili prevlaka kako bi se stvorila zaštita od korozije.

Za izradu okvira bicikla ugljični čelici se koriste za masovnu proizvodnju, dok se niskolegirani čelici (posebno čelici Cr-Mo i Mn-Mo) koriste za skuplje okvire tzv. „high-performance“ okviri bicikla. Okviri od čelika su prilično fleksibilni što poboljšava udobnost, uz nedovoljnu krutost koju imaju drugi materijali. Većina dijelovi bicikla izrađuju se od ugljičnih čelika. Niskolegirani čelici se koriste za izradu lokota. [20,21,22]

c) Titan

Od svih materijala koji se koriste pri izradi okvira bicikla, titanove legure su najskuplje. Titanove legure su vrlo čvrste i otporne na koroziju. Dije se prema mikrostrukтури na α -, β - i $(\alpha+\beta)$ -legure.

$(\alpha+\beta)$ -legure su glavni dio proizvodnje titanovih legura među njima je TiAl6V4 koja se često koristi za izradu okvira bicikla. Mikrostruktura se može mijenjati toplinskom obradom. Čvrstoća $(\alpha+\beta)$ -legure ovisi o udjelima α -legure i β -legure i legirnim elementima otopljenim u njima te o efektima toplinske obrade.

Postupci spajanja TIG zavarivanjem te lijepljenjem su prikladni za sve vrste titanovih legura. TIG zavarivanje je posebno prikladno za tanke materijale. Završna obrada titanovih dijelova je uglavnom anodizacija kako bi se zadržala mala masa.

Kako je titan otporan, lagan i vrlo čvrst koristi se za izradu okvira bicikla prikazan na slici 10. No, s obzirom na visoku cijenu titana i TIG postupka zavarivanja, ovakvi okviri su iznimno skupi. Moguće je proizvoditi okvire bicikla 50 % lakše nego primjenom čelika. Geometrija titanovih okvira slična je čeličnim okvirima. Uporabom takve geometrije titanovi okviri su malo predimenzionirani, te time se postiže veća krutost.



Slika 10. Okvir od titanove legure [23]

d) Magnezij

Magnezij i njegove legure su lagan i čvrst materijal, s najmanjom gustoćom među svih tehničkim materijalima. Čisti magnezij se rijetko koristi za konstrukcijske svrhe zbog niske čvrstoće. Ima bolju specifičnu čvrstoću nego aluminij, ali je mnogo skuplji. Magnezij je zapaljiv, stoga njegova primjena zahtjeva posebne mjere zaštite. Oblikuju se lijevanjem, ekstrudiranjem, i sl. Proces spajanja provodi se mehanički, MIG i TIG postupkom zavarivanja te lijepljenjem.

Prednosti magnezijevih legura su mala masa, prigušenje vibracija, vrlo dobra livljivost, izvanredna rezljivost. Nedostaci su slaba otpornost na koroziju (podložan oksidaciji), ima HCP strukturu sa strogo ograničenom mogućnosti hladno deformiranja, ima nizak modul elastičnosti.

U prošlosti se često primjenjivao za izradu dijelova bicikla, u posljednje vrijeme njegova mala gustoća počela se koristiti za izradu okvira. Ovakvi okviri imaju vrlo dobra svojstva prigušenja vibracija i dobru specifičnu čvrstoću, ali zbog visoke cijene i zapaljivosti primjena magnezijevih legura je ograničena. [18,19,20,21,22,24]

e) Kompoziti s ugljičnim vlaknima

Kompoziti s ugljičnim vlaknima, poznatiji kao karbon, karbonska vlakna, ugljična vlakna, su kompozitni materijali koji se sastoje od ojačala (ugljičnih vlakana) i smole. Pri proizvodnji bicikla najčešće se koriste ugljična vlakna u obliku preprega. Prepreg se dobije natapanjem

tkanine ugljičnih vlakana s epoksilnom i/ili fenolnom smolom. Nakon natapanja tkanina prolazi kroz valjke i peć gdje se otapa i isparava višak smole i otapala. Prepreg se zatim ohladi da se spriječi daljne očvršnuće. Konačan oblik okvira bicikla dobije se polaganjem u kalup te zagrijavanjem preprega (uglavnom u autoklavu) gdje prepreg nakon utjecaja topline očvrstne. Oblikovanje kompozita s ugljičnim vlaknima je relativno jednostavno što olakšava proizvođačima okvira lakšu rukovanje.

Prednosti mala gustoća, visoka čvrstoća i krutost. Nedostaci kompozita s ugljičnim vlaknima su visoka cijena, loša otpornost na udarce i sklonost oštećenjima. U slučaju oštećenja jako se teško popravljaju.

Primjena kompozita s ugljičnim vlaknima najčešća je za izradu cestovnih bicikla [slika 11], posebno za natjecanja. Također, posljednjih godina raste primjena i kod okvira brdskih i ostalih bicikla te dijelova bicikla. Iako ovaj materijal pokazuje velik potencijal zbog visoke cijene nije prikladan za masovnu proizvodnju [18,19,20,21,22].



Slika 11. Okvir od kompozita s ugljičnim vlaknima [25]

f) Drvo

Drvo je prirodan, tehnički materijal koji je od davnina u ljudskoj primjeni. Zbog svoje niske gustoće i lake obradivosti često se primjenjuje u građevinarstvu, brodogradnji, proizvodnji vozila poljoprivrede, itd. Kao sirovina služi za proizvodnju papira i celuloze.

Drvo je recikličan, obnovljiv i biorazgradiv materijal koji iako se želi zamjeniti polimerima i metalima i dalje ima široku primjenu. Može se primjenjivati u obrađenom ili neobrađenom

stanju te se može prerađivati kemijskim procesima koksiranjem, hidrolizom, kemijskom razgradnjom, suhom destilacijom i ekstrakcijom. Kemijskom obradom dobivaju se proizvodi za kao što su ugljen, smole, tanin (za kožnu industriju), drveni katran, drveni plin, itd.

Drvo po građi nije homogeno. Presjek stabla može biti radijalan, tangencijalan i poprečan. Struktura je vlaknasta, a pretežno se sastoji od celuloze, lignina i smola. Ugljik (50%), kisik (43,5%), vodik (6%) i dušik (0,2%) su glavni elementi od kojih se sastoji drvo. Čvrstoća drva ovisi o smjeru vlakana i udjelu vlage. Opterećenjem u smjeru vlakana postiže se najviša, dok okomito na smjer postiže se najniža čvrstoća. U vlažnoj okolini drvo se širi dok se u suhoj skuplja. Također, pri konstantnim izmjenama uvjeta okoline i prisutnost vlage dovode do truljenja drva. Nedostatak drva je zapaljivost. [1,20,21,22] Drvo je nekada bilo najzastupljeniji materijal pri izradi bicikla. Prvi okviri bicikla izrađivali su se od drva sve do popularizacije čelika. Danas se drveni okviri ne izrađuju često u masovnoj proizvodnji, međutim pojedini ljubitelji biciklizma i umjetnici skloni su ovakvim okvirima zbog unikatnosti, elegancije i ekološke svijesti. Na slici 12 su prikazani moderni drveni bicikli. Nedostatak drvenih okvira bicikla, osim kompleksnije tehnologije izrade, je velika masa [1,22].



Slika 12. Vožnja na drvenim biciklima [26]

g) Ostali materijali

Razvojem industrije i velikim zagađenjem okoliša, stvorila se potreba za ekološki prihvatljivijim rješenjem u biciklističkoj industriji. Stoga se danas provode razna istraživanja i razvoj kako bi biciklizam uznapredovao tehnički, ali i ekološki.

Tvrtka Muzzicycles iz Brazila uspjela je razviti i izraditi okvir od recikliranih polimera. Osim recikliranih polimera, konoplja, karton i bambus primjenjuju se za izradu okvira. [27]

Njemačka tvrtka Onyx – Composites koristi konoplju za izradu okvira. Prema njihovim mjerenjima vlačna čvrstoća njihovog okvira je 310 – 390 MPa uz krutost od 69 GPa što je približno jednako pojedinim aluminijskim okvirima (vlačna čvrstoća 350 – 390 MPa, krutost 70 GPa). [28]

Tvrtka Cardboard Technologies iz SAD-a otišla je korak dalje s izradom okvira od kartona, prikazan na slici 13. Posebnom tehnikom slaganja kartona postigla su se prihvatljiva mehanička svojstva. Ekološki i stilski je prihvatljiv jer je u potpunosti izrađen od recikliranog kartona i recikliranih polimera. [29]



Slika 13. Bicikl od kartona tvrtke Cardboard Technologies [30]

Primjena bambusa pri izradi okvira počela je krajem 19.stoljeća u Velikoj Britaniji. Otkriven je potencijal bambusa, međutim rasla je popularnost čeličnih, a kasnije i aluminijskih okvira stoga je bambus zaboravljen kao materijal za okvir bicikla. Tvrtke kao što Bambooride, BME Design, Ozon Bikes, Craig Calfee Designs i Panda Bikes nude „novo-staro“ rješenje za biciklističku industriju – okvire od bambusa. S obzirom da je bambus brzo rastuća biljka te je ima u izobilju, može se primjenjivati kao alternativa za tradicionalne materijale. Bambus bicikli su pokazali izvanredna svojstva kao što su vrlo dobro prigušenje vibracija i dobra krutost, zadržavajući malu masu. Vrlo su udobni za vožnju, primamljivog su izgleda i

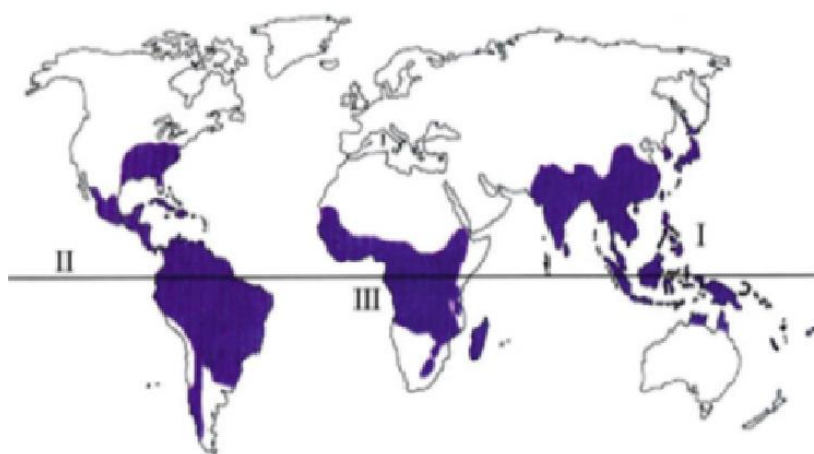
ekološki su prihvatljivi. Međutim, nedostatak detaljnih i pouzdanih podataka potaknuo je želju i priliku za istraživanjem, mjerenjem i primjenjivanjem bambusa kao materijal za okvir bicikla [slika 14].



Slika 14. Bambus bicikl [31]

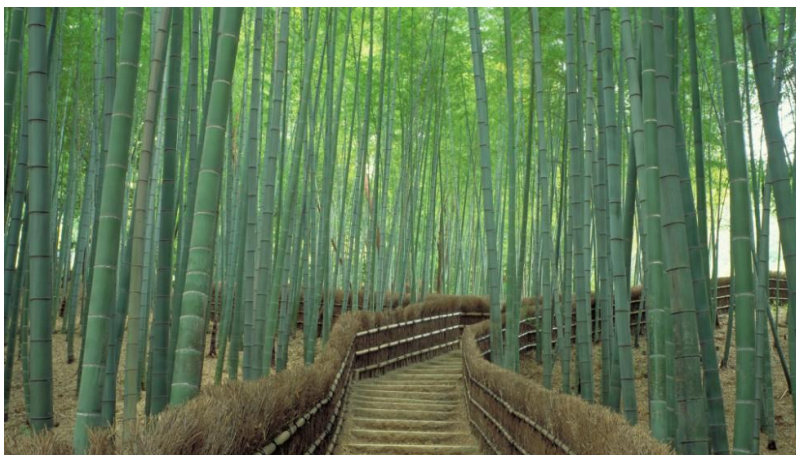
3. BAMBUS

Bambus je opći naziv skupine velikih biljaka koje spadaju u porodicu trava. Postoji 75 rodova s više od 1250 vrsta bambusa, većina njih brzo raste i dozrijevaju nakon pet godina. Pripadaju porodici Herbaceous trava i podporodici Bambusoideae. Bambus ima šuplju cilindričnu stijenku koja je podjeljena čvorovima. Čvorovi daju bambusu čvrstoću. Anizometričan je materijal i ima visoku čvrstoću u smjeru vlakana, a nisku okomito na smjer vlakana. Bambus raste u Aziji, Americi i Africi prikazano na slici 15. Svakodnevno bambus primjenjuje 2,5 milijardi ljudi, uglavnom za hranu i primjenom bambusovih vlakana.



Slika 15. Područja rasta bambusa u svijetu [37]

Prve primjene bambusa u umjetnosti i tehnologiji su zapisane od starih Kineskih učenjaka. No, iako se primjenjivao od davnina detaljna klasifikacija bambusa nikada nije napravljena. U prošlom stoljeću napravljen je pomak u klasifikaciji i razumjevanju bambusa. Pomoću DNK analize u kombinaciji s morfološkim i anatomskim ispitivanjima napravljene su osnovna podjela bambusovih vrsta. Šuma bambusa prikazana na slici 16 [32,33,36,37]



Slika 16. Bambus šuma u Japanu [34]

3.1. Podjela bambusa

Bambus je rasprostranjen po gotovo cijelom svijetu od umjerenih do tropskih klima, raste na svim kontinentima osim Antartike i Europe. Šuma bambusa prikazana na slici 17.



Slika 17. Bambus šuma u Kini [37]

Sve vrste Bambusoidea dijele zajedničkog pretka prema podacima dobivenim proučavanjem DNK. To potvrđuje prisutnost asimetričnih izvrnutih stanica. [32,33,37]

Bambusoideae se dijele na tri glavne loze:

- Olyreae (travnati bambus)
- Arundinarieae (umjereni drvenasti bambus);
- Bambuseae (tropski drvenasti bambus)

a) Porodica Olyreae

Biljke s slabo razvijenim rizomima i/ili s slabo razgranatim korijenom. Stabljika je slabo odrvenjena s malom prisutnošću uzdužnih grana. Ne sadrži listove na stabljici, ponekad prisutno na većim primjericima. Cvjetanje je uglavnom godišnje ili sezonski, rijetko cvjeta u grupi i ne dolazi do ugibanja nakon cvjetanja. Klas je uniseksan.

Olyreae su travnati bambusi. Ova grupa se sastoji od 22 roda i 124 podvrste te raste na području južne i srednje Amerike, uz dvije iznimke vrsta *Buergersiochloa* koja raste na Novoj Gvineji i Papui, i *Olyra latifolia* koja raste u Africi i Šri Lanki.

b) Porodica Arundinarieae

Kod ove porodice rizomi su dobro razvijeni, neke vrste imaju imaju korijen koji se ne grana (eng. *clumpping bamboo*) dok većina ima korijen koji se grana (eng. *running bamboo*). Imaju drvenastu šuplju i razgranatu stabljiku. Uglavnom imaju jednu granu po čvoru. Lišće je dobro razvijeno i različitih boja. Proces cvjetanja nastupa ciklički i grupno nakon čega bambus ugiba. Značajnije vrste iz ove porodice su *Acidosasa*, *Ampelocalamus*, *Arundinaria*, *Bashania*, *Bergbambos*, *Drepanostachyum*, *Fargesia* [slika 18], *Ferocalamus*, *Gaoligongshania*, *Gelidocalamus*, *Himalayacalamus*, *Indocalamus*, *Indosasa*, *Kuruna*, *Oldeania*, *Oligostachyum*, *Phyllosasa*, *Phyllostachys*, *Pleioblastus*, *Pseudosasa*, *Sasa*, *Semiarundinaria* i *Yushania*.



Slika 18. Bambus iz porodice Arundinarieae- *Fargesia rubusta* [35]

c) Porodica Bambuseae

Kod porodice Bambuseae rizomi su dobro razvijeni uglavnom imaju korijen koji se ne grana (eng. *pachymorph*), ali ima i vrsta koji imaju korijen koji se grana (eng. *amphimorph*). Stabljika je uglavnom šuplja i drvenasta (nisu šuplje samo bambusi roda *Chusquea*). Uglavnom imaju jednu granu po čvoru. Lišće je dobro razvijeno, ponekad lišće nije toliko prisutno ovisi o vrsti. [32,33,37]

3.2. Primjena bambusa

Bambus je bitan dio ekosustava. Ključan je za preživljavanje mnogih životinjskih vrsta. U Aziji, ugrožene vrste crveni panda i veliki panda, kao i crni medvjed ovise o nekoliko vrsta bambusa koji su im glavni izvor hrane. U Africi, 90% prehrane 650 preostalih planinskih gorila sastoji se od bambusovih mladica. Na Madagaskaru, sve vrste lemura se hrane bambusovim mladicama.

Osim utjecaja na životinjski svijet, bambus je ostavio jak utisak na ljudsku kulturu posebno u jugoistočnoj Aziji. Postoji više od 1500 komercijalnih primjena. Bambus je tradicionalna biljka korištena na različitim kontinentima i u različitim kulturama. Najznačajnija primjena je u Aziji, a daljnim istaživanjem vrsta počinje se sve više primjenjivati i u Americi i Europi. Osim za hranu može se primjenjivati kao bio-gorivo, građevini, alkohol, izrada namještaja, parketa itd. Primjena kompozita ojačanih bambusovim vlaknima ima široku primjenu izrade između ostalog i u vozilima. Koristi se za izgradnju kuća, mostova, namještaja, vodovoda, glazbenih instrumenata i sl. Stoljećima je bambus bio inspiracija za filozofiju, umjetnost i pjesme. Danas se bambus uzgaja u komercionalne svrhe kao što su izrada podova (parketi), namještaja, papira, tkanine, hrane, itd. Bambus postaje zamjena za drvo u izradi papira (25% papira u Indiji izrađeno je od bambusa). Kina je vodeći proizvođač i izvoznik bambusovih mladica, štapova, podova i namještaja. U Africi nije razvijena proizvodnja i izvoz bambusa te se uglavnom koristi u lokalnoj ekonomiji. Koristi se u kućanstvu za izradu ograda, košara, čačkalica, namještaja, vodovoda, sustava za navodnjavanje te za hranu. U srednjoj i južnoj Americi se primjenjuje za izradu koliba koje su vrlo otporne na potrese. [32]



Slika 19. Ograda od bambusa [38]

Zbog male mase u odnosu na drvo, bambus je izazivao nepovjerenje, posebno u Europi, te je bio obilježen kao nekvalitetan, jeftin materijal. Međutim, primjena raste te se sve više razvijaju postupci prerade bambusa zbog novih eko-trendova [tablica 1]. Primjena se toliko proširila na „zapadnom tržištu“ da već postoje kućišta za računala, laptope (Asus Ecobook) i mobilne uređaje (iPhone). Francuska tvrtka Roof proizvodi kacige za motocikle izrađujući proizvod od 100% prirodnih vlakana zadržavajući dobra svojstva kako bi prošli zahtjevna sigurnosna ispitivanja. Osim kaciga proizvode tkanine s bambusovim vlaknima za ručnike, plahte i rublje. Bambus vlakna se dodaju ostalim vlaknima kako bi produljili trajnost proizvoda, a koristeći posebne tehnike mogu se dobiti različite teksture. Koristi se i u medicini i kozmetici, kao i za proizvodnju dječjih pelena, okvira naočala, itd. [32,33,36,37]

Tablica 1. Prikaz primjene bambusa [37]

Dio biljke za upotrebu	Primjer upotrebe	Potrebne osobine
Cijela biljka	Ukrasi	Izgled, način rasta
Cijela biljka	Ekološke svrhe – kontrola erozije tla te zaštita	Visoki rast i stopa rasta
Cijela biljka	Ekološke svrhe – stvaranje kisika	Brzi rast
Štapovi bambusa	Izgradnja kuća, poljoprivrednih pomagala	Čvrst, krut i ujednačen štap
Štapovi bambusa	Građevina	Ravan i čvrst štap
Raspolovljeni štapovi	Izrada podova, parketa, laminata	Ravan s debelom stijenkom
Mladice	Hrana	Dobar okus
Pulpa	Proizvodnja papira i tkanine	Visoka produktivnost biomase
Ekstrakti	Katran, medicina, alkohol	Nema specifičnih zahtjeva

Iako o nekim vrstama postoji znatan broj istraživanja, o većini vrsta se jako malo zna. Većina istraživanja temelji se na 30-40 vrsta koje su komercionalne najzastupljenije, uglavnom su to vrste s područja istočne i jugoistočne Azije.

U Kini su se razvili proizvodi i postupci proizvodnje laminiranog bambusa za određenu vrstu uglavnom Moso bambus (*Phyllostachys pubescens*) što je doprinjelo nacionalnoj industriji vezanoj za bambus. Zbog činjenice da se vrste bambusa međusobno razlikuju, razlikuju se i tehnologije koje se koriste pri proizvodnji proizvoda. Stoga kako bi proizvodnja bambus proizvoda bila jednostavnija, komercijalno primjenjivani bambusi se grupiraju (npr. Moso bambus za čačkalice, laminiranje, Guadua za konstrukcije koliba, Tonkin Cane za ribičke štapove, itd.). Godine 1998. Međunarodna Mreža za Bambus i Ratan palmu (eng. *INBAR - International Network for bamboo and Rattan*) izdala je listu prioriternih vrsta bambusa i ratan palme (eng. "*Priority Species of Bamboo and Rattan*") na kojoj je definirano 20 vrsta i/ili rodova bilja koje su ključne ekonomske važnosti te još dodatnih bitnih 18 vrsta i/ili rodova bilja i te se liste nisu mijenjanje do danas.

Neke od komercijalno važne vrste bambusa su Moso bambus, Beema bambus, bambusa arundinacea, bambusa balcooa, Polymorpha bambus, Bambusa textilis, Dendrocalamus asper, Dendrocalamus giganteus, Guadua angustifolia, Arundinaria amabilis itd.

Moso bambus (*Phyllostachys pubescens*) je otkriven na jugoistoku Kine u Jiangxi provinciji. Naraste od 10 do 20 m, promjer stabljike je od 18 do 20 cm. Debljina stijenke je duplo veća od debljine stijenke normalnog fenotipa vrste te je time i čvrstoća veća. Svojstvo debele stijenke se pokazalo dominantnim u genetici biljke te se sada znatno proširio. Mladice imaju voskast prevlak. Ne cvjeta u grupama, cvjetanje se događa nasumično. Moso bambus je najprofitabilnija vrsta bambusa u Kini donosi godišnju zaradu od 2,6 milijardi eura [37].

Beema bambus je nastao križanjem bambusa balcooa iz Bihara u Indiji, a otkriven je prije deset godina. Stabljika je vrlo debela, te masa ovog bambusa je tri puta veća od mase normalnog bambusa balcooa. Također je povećana produktivnost proizvodnje tri do četiri puta je veća od normalnog bambusa balcooa.

Bambus arundinacea je vrlo tvrd, snažan i invazivan višenamjenski bambus. Raste na području južne Azije. Za njih su karakteristični deblji čvorovi što otežava razdvajanje.

Bambusa balcooa se koristi za poljoprivredni namještaj, pulpu, alat i konstrukcije, ali se ne koristi za skuplje proizvode.

Polymorpha bambus je srednje veličine. Naraste od 15 do 25 metara i do 15 cm u promjeru uz debljinu stijenke do 1 cm. Raste na području Bangladeša, Indije i Tajlanda. Cvjeta svakih 50 do 60 godina nakon čega ugiba. Koristi se u građevini i za izradu košara.

Bambusa textilis je srednje veličine, naraste do 15 m, u promjeru je od 3 do 5 cm. Osjetljiva vrsta bambusa s tankom stijenkom idealna je za tkanje. Koristi se za proizvodnju tkanine i vlakana.

Dendrocalamus asper pripada skupini velikih bambusa. Naraste od 20 do 30 metara s promjerom 8 do 20 cm i debljinom stijenke do 2 cm. Raste na području Indije, Nepala, Bangladeša i sjevernog Tajlanda. Dendrocalamus asper je višenamjenski bambus koji se najčešće koristi u građevini, ali je i poznat po vrlo ukusnim i slatkim mladicama.

Dendrocalamus giganteus također pripada skupini velikih bambusa. Rastu do 60 metara s promjerom 10 do 20 cm i debljinom stijenke do 2,5 cm. Zeleno-plave su boje te koriste se u građevini, izradi namještaja, izradi pulpe i vrlo su ukusni.

Guadua angustifolia naraste do 30 m. Tamno je zelene boje s bijelim kolutima oko čvorova. Promjer je do 20 cm. Raste na području latinske Amerike. *Guadua angustifolia* je ujedno i najkorišteniji bambus latinske Amerike. Stijenke su kvalitetne, velike i vrlo čvrste. Odlične su za izradu koliba, namještaja, pulpe i podova. Prikazan je na slici 20.



Slika 20. Primjena *guadua* bambusa u građevini [39]

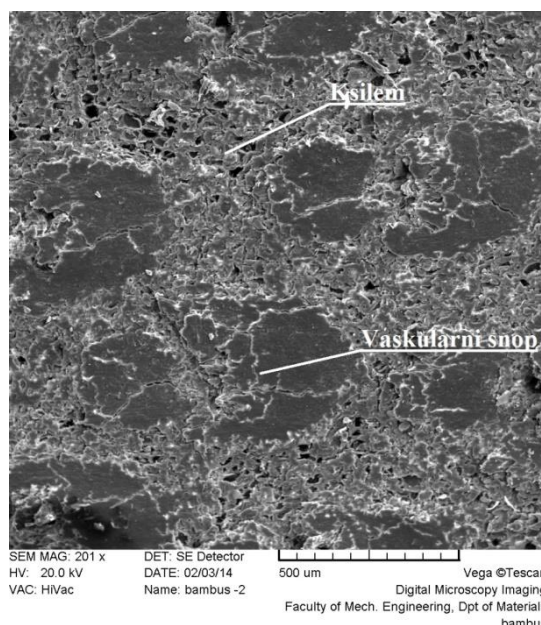
Tonkin Cane ili *Arundinaria amabilis* se više od sto godina koristi za proizvodnju visokokvalitetnih štapova za pecanje i skijaških štapova u Europi i sjevernoj Americi. Uzgoj je ograničen na jugozapad Guangdong provincije u Kini.

Phyllostachys vrste su ekonomski vrlo bitne. Postoji više od 100 vrsta *Phyllostachys* bambusa koji rastu na području Kine i Japana. Neke vrste su presađene po cijelom svijetu (npr. *Phyllostachys aurea* koja se koristi za izradu namještaja). Mladice mnogih vrsta *Phyllostachys* bambusa su jestive. Također pogodne su za građevinu, ali i ostale konstrukcijske svrhe kao što je izrada okvira bicikla.[32,33,36,37]

3.3. Struktura bambusa

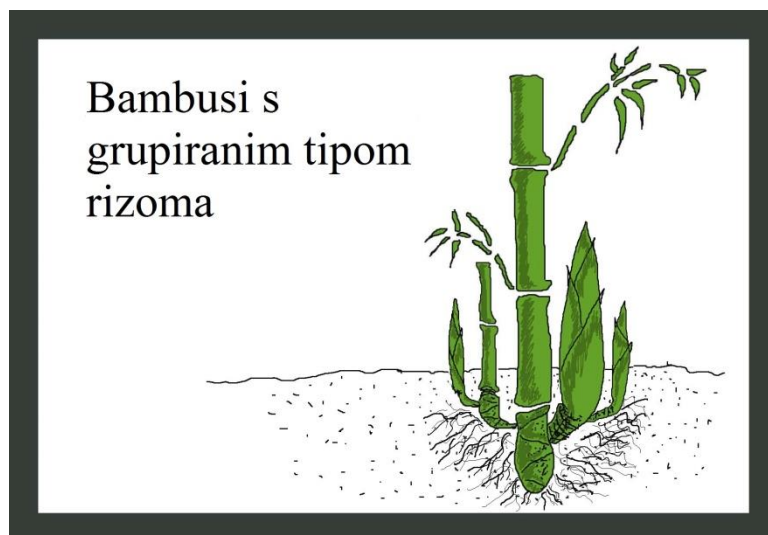
Bambus se dijeli na grmasti ili ne-grmasti tip te se klasificiraju kao visoki bambusi, patuljasti bambusi i bambusi penjači. Visoki bambusi uglavnom su dio šuma, dok patuljasti i bambusi penjači rastu uglavnom na višim nadmorskim visinama. Ono po čemu je bambus prepoznatljiv je šuplja cilindrična stabljika. Osim stabljike, sastoje se od rizoma, korijena, lišća, grana i pupova.

Stabljika bambusa podijeljena je čvorovima na članke. Uglavnom je šuplja, obavija ju stijenka, samo nekoliko vrsta nema šuplju stijenku. Debljina stijenke razlikuju se među vrstama i rodovima, kao i promjer stabljike. Stabljika se sastoji od 50% stanica parenhima (ksilem), 40% vlakana i 10 % vaskularnih snopova [slika 21]. Proučavanjem je zapaženo da broj vaskularnih snopova ne opada s visinom, dok se udio stanica parenhima smanjuje. Postotak vlakana povećava se prema vanjskom dijelu stijenke, dok se postotak stanica parenhima smanjuje. Dio stijenke bliže tlu ima više stanica parenhima, dok u višem dijelu ima mnogo malih vaskularnih snopova s visokim udjelom vlakana, što daje vitkost bambusu [37,40].



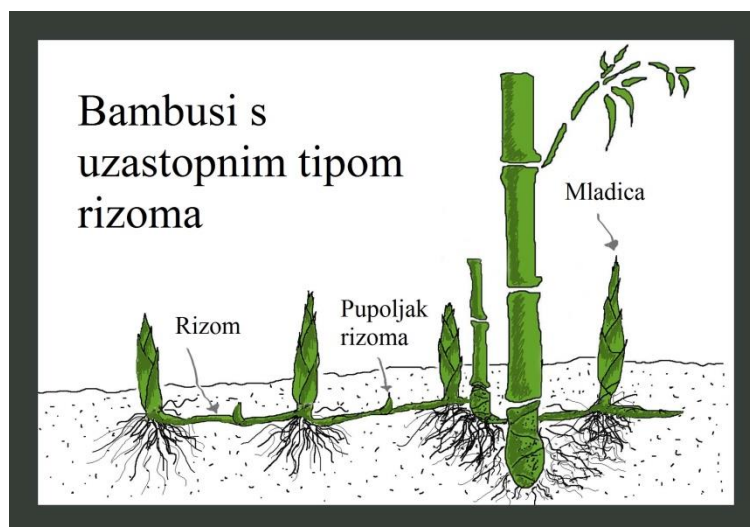
Slika 21. Poprečni presjek stijenke Moso bambusa [1]

Rizomi su razvijeni temelji bambusa koji se nalaze pod zemljom. Osim što daju stabilnost i krutost, pomoću rizoma se bambus širi. Postoje dvije osnovna tipa rizoma, to su grupirani tj. grmasti (eng. *Pachymorph* ili *Sympodial Rhizome*) i uzastopni tj. ne-grmasti (eng. *Leptomorph* ili *Monopodial Rhizome*). Grupirani rizomi imaju nekoliko većih podzemnih pupoljaka iz koji rastu stabljike bambusa. Grupirani rizomi [slika 22] se sastoje od vrata rizoma i izdanka rizoma. Bambusi koji imaju ovakav tip rizoma nazivaju se grupirani bambusi (eng. *Clumping bamboos*). [37,40]



Slika 22. Prikaz strukture grupiranog bambusa [41]

Uzastopni rizomi [slika 23] su dugi šuplji i cilindrični kao i stabljika. Šire se podzemno vodoravno do dubine 55 cm. Stvara se pozemna mreža rizoma iz kojih rastu stabljike. Ovaj tip rizoma karakterističan je za *Phyllostachys* vrste. Bambusi s ovakvim rizomima smatraju se vrlo invazivnim, nazivaju se bambusi trkači (eng. *Running bamboos*). Ostale morfološke karakteristike kao što su grane, lišće, pupovi i proces cvjetanja razlikuju se među vrstama.[37,40]



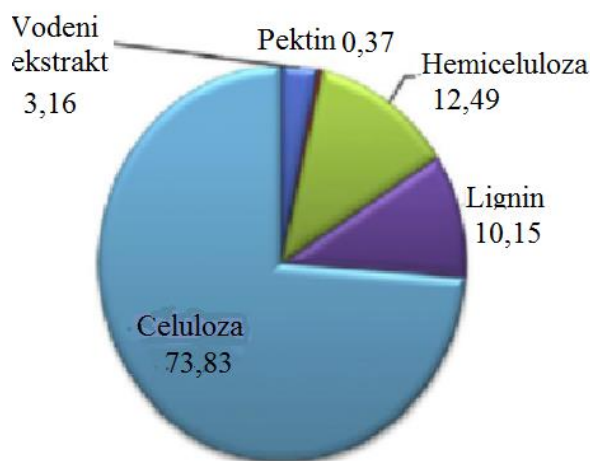
Slika 23. Prikaz bambusa strukture bambusa trkača [42]

3.4. Kemijski sastav

Kemijski sastav bambusa sastoji se primarno od celuloze, hemiceluloze i lignina [slika 24]. Ove komponente ujedno čine 90 % mase bambusovih vlakana. Ostali konstituenti su proteini, masti, pektin, tanin, pigmenti i pepeo. O ovim konstituentima ovisi fiziologija bambusa, koja se razlikuje od vrste do vrste.

Kemijski sastav kod bambusa mijenja se sa starenjem bambusa. Prema dosadašnjim ispitivanjima zabilježen je pad udjela celuloze sa starenjem bambusa. Lignin je konstituent koji je daje krutost i žutu boju bambusu. Također, lignin se pokazao izrazito otporan na alkalno djelovanje. Ne celulozne komponente djeluju na svojstva bambusa kao što je gustoća, čvrstoća, vlaga i fleksibilnost. [43]

Također, kemijski sastav se mijenja pri toplinskoj obradi bambusa. Rezultati djelovanja topline na bambusa još su nepredvidljivi, s obzirom na potencijal bambusa kao materijala, razne studije se bave ovim problemom. Kao i kod svih biljaka, i kod bambusa je prisutna voda. Udio vlage kod bambusa je značajan prema podacima [44] zeleni bambus sadrži od 50 do 150 % vlage u odnosu na masu nakon sušenja u peći. Taj podatak ovisi o vrsti, sezoni, mjestu mjerenja (dno stabljike ili vrh) te starosti stabljike.



Slika 24. Kemijski sastav bambusa [43]

Celuloza je linearni polimer, spada u ugljikohidrate polisaharide. Kovalentna veza među molekulama uzrokuje velika otpornost na vlažnu čvrstoću.

Hemiceluloza je prisutna skoro u cijeloj stijenki zajedno sa celulozom. Može biti bilo koji od heteropolimera. Slična je celulozi, ali nije tako kompleksna.

Lignin je integrirani dio stanične stijenke bambusa. Svrha lignina je popunjavanje prostora između celuloze, hemiceluloze i pektina te predaje čvrstoću stijenki bambusa. Lignin je ujedno i drugi najzastupljeniji organski spoj na Zemlji, poslije celuloze. Bitna karakteristika lignina je što je iznimno hidrofoban.

Pektin je heterosaharid koji se nalazi u staničnoj stijenki bambusa. Duljina lanca, složenost lanaca i redoslijed jedinica je raznolik kod pektina.

Pri utjecaju kiseline, pektin tvori gelnu otopinu te može se koristiti kao jestivi nadomjestak kod procesuiranja hrane, kao što je džem. [44]

3.5. Mehanička svojstva

Svojstva vlakana i matrice određuju mehanička svojstva bambusa. Udio vlakana je najznačajniji čimbenik pri određivanju mehaničkih svojstava. Naravno, nemoguće je izmjeriti točan iznos udjela vlakana nerazornim ispitivanjem. Mnogi znanstvenici se bave ovim problemom, ali trenutno se svojstva kao što su modul elastičnosti i vlačna čvrstoća povezuju s volumnim udjelom vlakana samo preko statistike. Vlakna su raspoređena u poprečnom presjeku uzduž cijelog radialnog smjera. Gustoća vlakana bliže vanjskom dijelu stijenke je veća nego prema unutrašnjosti. Jasno je da su zbog takve karakteristike bambusa i nejednolika mehanička svojstva po presjeku. Također, vlakna bambusa su duža od vlakna drva, stoga masa vlakana je zauzima 60-70 % ukupne mase stabljike bambusa [43,45]. Bambus ovu karakteristiku posjeduje zbog prilagodbe u prirodi gdje je zakopan u zemlju opterećen vjetrom i vlastitom masom, ta prilagodba mu omogućuje da izdrži momente savijanja. Čvrstoća je najviša uz vanjsku stijenku, a najniža uz unutarnju stijenku. Prema istraživanjima [45, 46] čvrstoća je viša pri dnu stabljike. Također su pokazala da bambus osjetljiv na međulaminarno pucanje, u sredini stijenke. Proučavana su istraživanja navedena u tablici 2 te su na osnovu njih napisan pregled rezultata za svojstva zanimljiva za ovaj rad.

Tablica 2. Dosadašnji rad

Autori	Provedena ispitivanja
[37] Liese, W.; Köhl, M.; Bamboo – The Plant and its Uses	Provedena ispitivanja statičkog savijanja, modula elastičnosti, tlačnog i smičnog naprezanja te udio vlage za 9 vrsta bambusa.
[43] Khalil A, Bhat I.U.H , Jawaid M, Zaidon A, Hermawan D, Hadi Y.S, Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review , <i>Materials and Design</i> 2012, 42, 353 do 369	Usporedba svojstava vlačne čvrstoće, modula elastičnosti kompozita s bambusovim vlaknima te usporedba gustoće, vlačne čvrstoće i modula elastičnosti bambusovih vlakana i staklenih vlakana.
[44] Wolfram Schott, Bamboo in the Laboratory , Studeni 2006	Promjena mehaničkih svojstava s promjenom udjela vlage, gubitak mase tijekom toplinske obrade, promjena dimenzija nakon toplinske obrade.
[45] Zhou Aiping, Huang Dongsheng, Li Haitao, Su Yi; Hybrid approach to determine the mechanical parameters of fibers and matrixes of bamboo , <i>Construction and Building Materials</i> 35 (2012) 191–196	Ispitivanje vlačne čvrstoće i modula elastičnosti bambusa.
[46] T. Tan, N. Rahbar, S.M. Allameh, S. Kwofie, D. Dissmore, K. Ghavami, W.O. Soboyejo; Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures , <i>Acta Biomaterialia</i> 7 (2011) 3796–3803	Ispitivanje vlačne čvrstoće bambusa.
[47] Janssen, J.A.: Bamboo research at the Eindhoven University of Technology , Eindhoven 1990	Ispitivanje vlačne , tlačne čvrstoće, modula elastičnosti, savojne čvrstoće i ponašanje pri lomu bambusa
[48] Ahmad, M. and Kamke, F.A.: Mechanical Properties of Calcutta Bamboo . Ph.D. Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Ch.4, 2000	Ispitivanje modula elastičnosti, vlačne čvrstoće i savijanja calcutta bambusa.
[49] Bhavna Sharma, Gatóo, A., Michael H. Ramage Effect of processing methods on the mechanical properties of engineered bamboo ; <i>Construction and Building Materials</i> 83 (2015) 95–101	Za laminirani bambus je ispitana vlačna čvrstoća, tlačna čvrstoća, smično naprezanje i savijanje u četiri točke.
[50] Michael R.G.; Microstructure and mechanical properties of bamboo in compression , Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Bachelor Thesis, Lipanj 2012	Ispitivanje presjeka uzoraka pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa, youngovog modula, tvrdoće, gustoće i tlačne čvrstoće.

<p>[51] T. Gutu <i>A Study on the Mechanical Strength Properties of Bamboo to Enhance Its Diversification on Its Utilization</i>, International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-2, Issue-5, April 2013</p>	<p>Usporedba svojstava modula elastičnosti, savojne, tlačne i vlačne čvrstoće te smičnog naprezanja čelika, bambusa i drva. Usporedba tvrdoće, savojne čvrstoće i gustoće bambusa, bora, kompozita sa staklenim vlaknima, hrasta i tikovine.</p>
<p>[52] Cyril Okhio Ph.D., C.Eng.; Jeroen Waning, B.Sc.; Yemeserach T. Mekonnen, B.Sc.; <i>An Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Bamboo and Cane</i>, Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Bioengineering (JSAB), September Edition, 2011</p>	<p>Ispitivan je modul elastičnosti, savojna, tlačna i vlačna čvrstoća.</p>
<p>[53] Bhavna Sharma, Ana Gatóo, Maximilian Bock, Michael Ramage; <i>Engineered bamboo for structural applications</i>, Construction and Building Materials 81 (2015) 66–73</p>	<p>Ispitivanje tlačne, vlačne, savojne (u 4 točke) čvrstoće i smičnog naprezanja laminiranog bambusa i sirovog te usporedba rezultata.</p>
<p>[54] K.F. Chung *, W.K. Yu; <i>Mechanical properties of structural bamboo for bamboo Scaffoldings</i>, Engineering Structures 24 (2002) 429–442</p>	<p>Ispitivanje tlačne i savojne čvrstoće te ponašanje nakon vlačne komore, mjeren modul elastičnosti <i>Bambusa pervariabilis</i> (Kao Jue) i <i>Phyllostachya Pubescens</i> (Mao Jue)</p>
<p>[55] Tommy Y. Lo*, H.Z. Cui, H.C. Leung; <i>The effect of fiber density on strength capacity of bamboo</i>, Materials Letters 58 (2004) 2595– 2598</p>	<p>Vrste <i>Bambusa pervariabilis</i> (Kao Zhu) i <i>Phyllostachya Pubescens</i> (Mao Zhu) usporedba tlačne čvrstoće, proučavanje starost, proučavanje promjera, usporedba vlakana te gustoća vlakana</p>

a) Modul elastičnosti

Modul elastičnosti je jedan od najznačajnijih mehaničkih svojstava. Predstavlja krutost materijala, koja je vrlo važno svojstvo materijala. Prema dosadašnjim mjerenjima ako se naruši presjek bambusa modul elastičnosti se smanjuje. Kao i kod drva modul elastičnosti se smanjuje za 5 do 10 % s porastom naprezanja. Velik modul elastičnosti je još jedna prednost primjene bambusa kao konstrukcijskog materijala.

Prema ispitivanjima [37] ispitivanjem statičkog savijanja dobiveni su rezultati za vrste *Dendrocalamus Maclellandii* 41899 N/mm², dok je *Bambusa longispiculata* 31451 N/mm², a *Guadua bamboo* 17608 N/mm².

U radu [43] ispitivani kompozit s 30% bambus vlakana i polipropilenskom matricom ima modul elastičnosti približno 1357 N/mm² dok kompozit s 30% bambus vlakana i matricom polietilena visoke gustoće ima modul elastičnosti približno 2674 N/mm².

Promjenom udjela vlage za 1% modul elastičnosti bambusa mijenja se za 2 % [44].

Prema ispitivanju [45] modul elastičnosti je dobiven pokusom i računalnim modelom (metoda konačnih elemenata), ispitano je 12 uzoraka te iznosi između 5144 N/mm² do 14995 N/mm².

Modul elastičnost, kod ispitivanja [48] provedenih na calcutta bambusu, iznosi 12733-16779 N/mm².

Na MIT-u (eng. *Massachusetts Institute of Technology*) mjeren je modul elastičnosti bambusa *Phyllostachis dulcis* [50] te iznosio je 15000 - 18000 N/mm².

U članku [51] uspoređen je iznos modula elastičnosti bambusa s modulom elastičnosti drva i čelika. Prema njihovim podacima modul elastičnosti bambusa iznosi 20000 N/mm², drva 11000 N/mm², a čelika 21000 N/mm².

Ispitivanja na dvije vrste bambusa Kao Zhu (lat. *Bambusa pervariabilis*) i Mao Zhu tj. Moso bambus (lat. *Phyllostachya Pubescens*) [54] provedena su s ciljem istraživanja o mogućnosti primjene bambusa za izradu građevinskih skela. Modul elastičnosti Kao Zhu bambusa je 4000 – 12000 N/mm², dok za Mao Zhu 5000 – 10000 N/mm².

b) Vlačna čvrstoća

Bambus zbog svoje građe i dugih vlakana može izdržati viša vlačna naprezanja nego tlačna.

Prema ispitivanju [43] biokompozit s 30% bambus vlakana i polipropilenskom matricom ima vlačnu čvrstoću približno 25,80 N/mm². Dok biokompozit s 30% bambus vlakana i matricom polietilena visoke gustoće ima vlačnu čvrstoću približno 25,47 N/mm². Također, prikazani su podaci prema kojima bambus vlakna imaju vlačnu čvrstoću 500-575 N/mm².

U radu [45] rezultati su dobiveni ispitivanjem i računalnim modelom (metoda konačnih elemenata) ispitano je 12 uzoraka te iznosi između 85 N/mm² do 231 N/mm².

Prema ispitivanjima [47] elastična vlakna bambusa mogu izdržati vlačna naprezanja do 400 N/mm², dok čvrsto drvo podnosi vlačna naprezanja do 50 N/mm².

Ispitivanja vlačne čvrstoće [48] su provedena na calcutta bambusu pri brzini 0,254 cm/min. Uzorci su bili izloženi temperaturi 20°C i relativnoj vlažnosti 65% u trajanju od 3 tjedna.

Prosječna vlažnost uzorka je bila 11,4 %, rezultati vlačne čvrstoće su između 156,14 N/mm² i 185,3 N/mm².

Ispitane su vlačne čvrstoće laminiranog Moso bambusa (namjenjen za podove) [49] prema ASTM D143 normi nakon kemijskih procesa izbjeljivanja odnosno karmeliziranja, zatim su vrijednosti uspoređene. Vlačna čvrstoća nakon procesa izbjeljivanja iznosi 124 N/mm², nakon procesa karmeliziranja iznosi 90 N/mm². Također je ispitana vrijednost ne obrađivanog uzorka Moso bambusa te vrijednost vlačne čvrstoće iznosi 153 N/mm². Prema čemu se može zaključiti da kemijska obrada djeluje nepovoljno na iznos vlačne čvrstoće.

U članku [51] uspoređen je iznos vlačne čvrstoće s iznosom vlačne čvrstoće drva. Prema njihovim podacima vlačna čvrstoća bambusa iznosi 197 – 286 N/mm², dok je iznos vlačne čvrstoće drva 78 – 145 N/mm².

Prema ispitivanjima [52] najviši iznos vlačne čvrstoće bambusa iznosio je 315,09 N/mm².

U članku [53] uspoređena su svojstva neobrađenog bambusa, laminiranog (izbjeljenog ili karmeliziranog) i prešanog (eng. *Bamboo scrimber*). Prema rezultatima vlačna čvrstoća neobrađenog bambusa iznosi 153 N/mm², laminiranog 90 N/mm² dok prešanog 120 N/mm².

c) Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća važno je svojstvo za primjenu bambusa. Tanje stabljike u usporedbi s većim, imaju veću tlačnu čvrstoću u smjeru i okomito na smjer vlakana. Podatak da tanje stabljike imaju bolju tlačnu čvrstoću je činjenica da deblje stabljike imaju mali udio vanjske kore koja je jako otporna na naprezanja. Longitudinalna cijepanja bambusa izazvana su strogo paralelnim vlaknima. Također, s obzirom da se radi o cilindričnom obliku, a ne okruglom obliku veća je i savojna čvrstoća. Kao što je ranije navedeno, značajan utjecaj na iznos tlačne čvrstoće ima udio lignina.

U radu [37] bambusi su sušeni na zraku (12 % udio vlage), te su dobiveni sljedeći rezultati tlačne čvrstoće za vrstu *Bambusa longispiculata* - 57.6 N/mm², a za *Dendrocalamus macclllandii* - 60.0 N/mm².

Ispitane su tlačna čvrstoće laminiranog Moso bambusa [49] prema BS 373 normi nakon kemijskih procesa izbjeljivanja odnosno karmeliziranja, zatim su vrijednosti uspoređene. Tlačna čvrstoća nakon procesa izbjeljivanja iznosi 55 N/mm², nakon procesa karmeliziranja

iznosi 77 N/mm^2 . Također je ispitana vrijednost ne obrađivanog uzorka Moso bambusa te vrijednost tlačne čvrstoće iznosi 53 N/mm^2 .

Na MIT-u (eng. *Massachusetts Institute of Technology*) mjerena je tlačna čvrstoća bambusa *Phyllostachis dulcis* [50] te iznosila je $40 - 95 \text{ N/mm}^2$.

U članku [51] uspoređen je iznos tlačne čvrstoće s iznosom tlačne čvrstoće drva. Prema njihovim podacima tlačna čvrstoća bambusa iznosi $36 - 65 \text{ N/mm}^2$, dok je iznos tlačne čvrstoće drva $33 - 58 \text{ N/mm}^2$.

Ispitivanja [52] pokazala su da tlačna čvrstoća bambusa iznosi $99,63 - 129,90 \text{ N/mm}^2$.

U članku [53] uspoređena su svojstva neobrađenog bambusa, laminiranog (izbjeljenog ili karmeliziranog) i prešanog (eng. *Bamboo scrimber*). Prema rezultatima tlačna čvrstoća neobrađenog bambusa iznosi 53 N/mm^2 , laminiranog 77 N/mm^2 dok prešanog 86 N/mm^2 .

Ispitivanja na dvije vrste bambusa Kao Zhu (lat. *Bambusa pervariabilis*) i Mao Zhu tj. Moso bambus (lat. *Phyllostachya Pubescens*) [54] provedena su s ciljem istraživanja o mogućnosti primjene bambusa za izradu građevinskih skela. Prema rezultatima tlačna čvrstoća Kao Zhu iznosi 103 N/mm^2 , dok za Mao Zhu 134 N/mm^2 .

U članku [55] mjerena je tlačna čvrstoća dviju vrsta bambusa. Za Kao Zhu bambus iznosi $37,72 - 61,97 \text{ N/mm}^2$, a za Mao Zhu bambusa $47,03 - 62,77 \text{ N/mm}^2$.

d) Savojna čvrstoća

Savojna čvrstoća je još jedna od značajnijih mehaničkih svojstava. Savijanje je sastavni dio većine konstrukcija, a može se pojaviti kao predviđeno opterećenje ili kao nepoželjno opterećenje.

U radu [37] savojna čvrstoća za *Bambusa longispiculata* iznosi $86,8 \text{ N/mm}^2$, *B. Burmanica* 137 N/mm^2 i za *D. Maclellandii* 126 N/mm^2 .

Prema ispitivanju [44] promjenom udjela vlage za 1% savojna čvrstoća bambusa mijenja se za 5 %

Ispitivanja savojne čvrstoće [48] su provedena na calcutta bambusu pri brzini $0,254 \text{ cm/min}$. Uzorci su bili izloženi temperaturi 20°C i relativnoj vlažnosti 65% u trajanju od 3 tjedna. Prosječna vlažnost uzorka je bila 9,4 %, rezultati savojne čvrstoće su između $137,08 \text{ N/mm}^2$ i $148,36 \text{ N/mm}^2$.

Ispitana je savojna čvrstoća laminiranog Moso bambusa [49] prema BS EN 408 normi nakon kemijskih procesa izbjeljivanja odnosno karmeliziranja, zatim su vrijednosti uspoređene. Savojna čvrstoća nakon procesa izbjeljivanja iznosi 76 - 79 N/mm², nakon procesa karmeliziranja iznosi 77 - 83 N/mm². Također je ispitana vrijednost ne obrađivanog uzorka Moso bambusa te iznosi 135 N/mm².

U članku [51] uspoređeni su iznosi savojnih čvrstoća bambusa, drva i čelika. Prema njihovim podacima modul elastičnosti bambusa iznosi 76 - 276 N/mm², drva 68 N/mm², a čelika 140 N/mm².

Prema ispitivanjima [52] savojna čvrstoća bambusa iznosi 4,3 – 4,41 N/mm².

U članku [53] uspoređena su svojstva neobrađenog bambusa, laminiranog (izbjeljenog ili karmeliziranog) i prešanog (eng. Bamboo scrimber). Prema rezultatima savojna čvrstoća neobrađenog bambusa iznosi 135 N/mm², laminiranog 77 – 83 N/mm² dok prešanog 119 N/mm².

Ispitivanja na dvije vrste bambusa Kao Zhu (lat. *Bambusa pervariabilis*) i Mao Zhu tj. Moso bambus (lat. *Phyllostachya Pubescens*) [54] pokazala su da je savojna čvrstoća (metoda tri točke) za Kao Zhu bambus 109 N/mm², dok za Mao Zhu 85 N/mm².

e) Tvrdća

Tvrdća je najvažnije svojstvo bambusa kod primjene za podove odnosno parkete. Na MIT-u (eng. *Massachusetts Institute of Technology*) mjerena je tvrdća bambusa *Phyllostachis dulcis* [50]. Tvrdća je iznosila između 380 – 530 N/mm².

f) Gustoća

Niska gustoća je najveća prednost bambusa pri konstruiranju proizvoda. Zbog velikog broja vrsta bambusa, za mnoge vrste nije mjerena gustoća. Gustoća bambusa iznosi između 400 - 900 kg/m³, ovisno o vrsti. Stoga su izdvojeni pojedini rezultati ispitivanja. Prema ispitivanjima [37] nekoliko vrsta bambusa je sušeno u pećnici te je zabilježena gustoća *Bambusa longispiculata* 730 kg/m³, dok je *D. Maclellandii* 830 kg/m³.

U ispitivanju [43] prikazani su podaci prema kojima bambus vlakna imaju gustoću 1200–1500 kg/m³.

Ispitana je gustoća laminiranog Moso bambusa [49] nakon kemijskih procesa izbjeljivanja odnosno karmeliziranja, zatim su vrijednosti uspoređene. Gustoća nakon procesa izbjeljivanja iznosi 644 kg/m³, nakon procesa karmeliziranja iznosi 686 kg/m³. Također je ispitana vrijednost ne obrađivanog uzorka Moso bambusa te vrijednost tlačne čvrstoće iznosi 666 kg/m³.

U članku [51] mjerena je gustoća nepoznate vrste bambusa, iznos izmjerene gustoće je 545,8 kg/m³.

Mjerena je gustoća [54] bambusa Kao Zhu (lat. *Bambusa pervariabilis*) iznosi 798,8 kg/m³, a za Mao Zhu tj. Moso bambus (lat. *Phyllostachya Pubescens*) iznosi 793,9 kg/m³.

g) Utjecaj vlage

Za svakodnevnu primjenu bambusa važno je uračunati utjecaj vlage na bambus. Neočekivano ponašanje bambusa zbog utjecaja vlage može biti pogubno za konstrukciju. Potrebno je provesti detaljno proučavanje kako bi se smanjila mogućnost nepoželjnih i nepoznatih pojava. Prema radu [44] zagrijavanjem bambus gubi značajno masu. Nakon 10 min grijanja pri 200°C bambus izgubi 7,5% mase zbog smanjenja udjela vlage.

Ispitivanja [54] na dvije vrste bambusa Kao Zhu (lat. *Bambusa pervariabilis*) i Mao Zhu tj. Moso bambus (lat. *Phyllostachya Pubescens*) provedena su s ciljem istraživanja o mogućnosti primjene bambusa za izradu građevinskih skela. Dobiveni rezultati su pokazali kod Kao Zhu bambusa s povećanjem udjela vlage za 15 % smanjuje se čvrstoća za 50 % i krutost za oko 20%. Dok za Mao Zhu bambus s povećanjem udjela vlage za 25%, čvrstoća i krutost se smanjuju za oko 30%.

3.6. Vrste prikladne za izradu bicikla

Proučavanjem morfologije, anatomije i fiziologije može se zaključiti da bambusi iz porodice Arundinarieae su najprikladniji za izradu bicikla. Vrste kao što su *Phyllosasa*, *Phyllostachys*, *Pleioblastus*, *Pseudosasa*, *Sasa*, *Semiarundinaria*, *Yushania*, *Fargesia*, *Arundinaria* odgovaraju geometrijski za okvir bicikla. Stoga su za istraživanje u ovom radu izabrane dvije vrste materijala koje će biti ispitivane te u slučaju zadovoljavajućih rezultata primjenjene za izradu okvira bicikla. Izabrane vrste su *Pseudosasa amabilis* ili tonkinov bambus i *Pleioblastus amarus* ili Ku Zhu bambus (gorki bambus).

Pseudosasa amabilis ili tonkinov bambus, također poznat pod latinskim nazivom *Arundinaria amabilis*, spada u porodicu trava. *Pseudosasa* je rod bambusa koji je zastupljen na istoku Azije. Latinski naziv potječe zbog sličnosti s rodom *Sasa*. Ova vrsta bambusa prirodno je zastupljena u Kini, Japanu, Koreji i Vjetnamu, a prenešena je na područje Europe, Sjeverne Afrike, Sjeverne Amerike i Novog Zelanda. [56]

Tonkinov bambus poznat pod engleskim nazivima Tonkin Cane, Tea Stick bamboo, Tsingli cane te kineskom nazivu cha gan zhu [57]. Tonkinov bambus [slika 25] ime je dobio po zaljevu Tonkin u provinciji Guangdong u Kini jer tamo originalno rastao na području od oko 190 km² i smatra se najčvršćim bambusom zbog visoke gustoće vlakana. Tonkinov bambus raste od pješčanog do glinenih tla, gdje su mu potrebne normalne ili povišene količine vode. Spada pod jestive bambuse, a često se koriste u sportu te u estetske svrhe. Stabljike Tonkinovog bambusa narastu do 17 m. Promjer mladica je od 2 – 6 cm, boja je maslinasto zelena, dok je promjer zrele stabljike 30 -50 cm glatke, sive površine. Na jednom čvoru nalazi se od 1 do 3 grančice. Stabljike imaju visoka mehanička svojstva, velike količine se izvoze u SAD i Europu najčešće zbog izrade ribičkih štapova i skijaških štapova. Ribičima su ribički štapovi od Tonkinovog bambusa iznimno zanimljivi, zbog njihove fleksibilnosti, ali i čvrstoće te su ravni i imaju velik razmak između čvorova. Stabljike su jako ravne te imaju debelu stijenku bez čvorova koji se ističu. Poznat je po visokoj kvaliteti stabljike. Nije jako iskrivljen od vrha do dna stoga je prigodan za konstrukcijske upotrebe [58,59,60].



Slika 25. Tonkinov bambus

Pleioblastus amarus ili gorki bambus (kineski naziv Ku Zhu bambus) iz porodice *Arundinarieae*. *Pleioblastus* je rod bambusa s područja Istočne Azije. Prirodno je rasprostranjen je na području Kine i Japana, dok je donešen u Koreu, Europu te Novi Zeland.

Ku Zhu bambus ili gorki bambus raste od pješčanog do glinenih tla, gdje prima normalne ili povišene količine vode. Spada pod jestive bambuse, a često se koriste u estetske svrhe. Gorki bambus naraste do 7 m visine. [61] Ova vrsta [slika 26] kad je mlada ima voskastu bijelu stabljiku duljine 3 – 5 metara te promjera 1,5 do 2 cm. Zeleno do zeleno- ljubičaste je boje. Kad dosegne zrelost postaje žuto-zelena cilindričnog oblika, promjera do 38 cm te debljine stijenke oko 6 mm. [62] Na čvorovima može narasti do 7 grančica. Otporna je na suše, toplinu, vlagu, zagađenje te životinjske utjecaje. Pri povoljnim uvjetima jako se brzo šire te se smatraju kao korov. Ova vrsta raste na ravnicama te nižem gorju. Mogu imati grupirani ili uzastopni rizome. Stabljike s grupiranim rizomom uobičajeno su u subtropskim i tropskim područjima, dok s uzastopnim rizomom nalaze pretežito u umjerenoj klimi. Može se pronaći na istoku i jugoistoku Kine [63].



Slika 26. Ku Zhu (gorki bambus) [61]

4. REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA

Materijal za laboratorijska ispitivanja je bambus dobiven od austrijske tvrtke Bambooride. Ispitivanje će se provesti na dvije vrste bambusa: Tonkinov bambus (lat. *Pseudosasa amabilis*) ubran 2012. godine i gorki bambus (lat. *Pleioblastus amarus*) ubran 2013. godine. Prema podacima dobivenim od austrijske tvrtke Bambooride bambus štapovi rasli su u Kini, rezani su sa stabljike starije od 3 godine, sušeni su šest mjeseci u sobi s vlažnosti zraka 30 % bez ikakvih kemijskih tretmana i nakon toga skladišteni u prostorijama s 40-50% vlažnosti i temperature 20-25 °C.



Slika 27. Bambus cijevi

Vizualnim pregledom procijenjeno je stanje dobivenih cijevi, zatim su označeni i izmjerena im je duljina i unutarnji i vanjski promjer cijevi. S obzirom da su bambusove cijevi približno cilindrične, uzeta je srednja vrijednost promjera koji je mjeran na svakom kraju cijevi te na sredini. Također, na istom principu mjerena je debljina stijenke. Uz navedene mjere, procijenjeno je stanje bambus cijevi (oblik, deformacije, pukotine) kako bi se eventualna pojava anomalije rezultata mogla objasniti. U tablici 3 i 4 se nalaze podaci o bambus cijevima.

Tablica 3. Dimenzije cijevi tonkinovog bambusa

Tonkinov bambus	Duljina [mm]	Prosječni promjer [mm]	Debljina stijenke [mm]	Napomena
1	708	62,2	4,4	Odlično stanje
2	697	59,0	4,6	Odlično stanje
3	710	56,6	4,9	Odlično stanje
4	701	57,0	5,1	Vrlo dobro stanje
5	697	50,7	6,0	Vrlo dobro stanje
6	707	50,0	5,3	Udubljenje na sredini
7	706	38,3	5,0	Udubljenje na sredini
8	565	43,0	5,2	Ima rupu
9	683	26,2	4,0	Odlično stanje
10	698	24,8	3,8	Odlično stanje
11	702	25,2	4,2	Odlično stanje
12	690	25,3	3,6	Odlično stanje
13	698	23,7	3,0	Vrlo dobro stanje
14	710	23,5	3,6	Odlično stanje
15	700	25,7	6,5	Odlično stanje
16	709	22,5	3,0	Odlično stanje
17	280	25,3	7,5	Odlično stanje

Tablica 4. Dimenzije cijevi gorkog bambus

Gorki bambus	Duljina [mm]	Prosječni promjer [mm]	Debljina stijenke [mm]	Napomena
18	709	40,9	5,1	Odlično stanje
19	704	46,1	5,0	Velika pukotina
20	703	45,2	4,4	Odlično stanje
21	694	44,0	8,5	Odlično stanje
22	708	38,3	6,3	Vrlo dobro stanje
23	708	40,5	4,4	Odlično stanje
24	706	25,0	4,7	Odlično stanje
25	704	23,2	4,5	Vrlo dobro stanje

Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za mehanička ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Cilj ispitivanja je odrediti mehanička svojstva odabranih dviju vrsta bambusa, usporediti ih s tradicionalnim materijalima koji se koriste za izradu okvira bicikla te procijeniti mogućnost primjene za izradu okvira bicikla.

U prvoj fazi, uzorci će biti opterećeni na vlak, tlak, savijanje i izvijanje te će se ispitati tvrdoća uzoraka. Skenirajućim elektronskim mikroskopom promatrati će se presjek uzoraka nakon loma nastalog zbog vlačnog naprezanja.

Druga faza ispitivanja je mjerenje mase uzoraka koji će biti izloženi vlažnim uvjetima u trajanju od 21 dan. Izloženim uzorcima biti će izmjerena masa kako bi se mogla izmjeriti promjena udjela vlage u uzorcima. Također, uzorci će biti opterećeni na vlak, tlak i savijanje te uspoređeni s uzorcima koji nisu bili izloženi vlažnim uvjetima, čime će se prikazati promjena mehaničkih svojstava uslijed djelovanja vlage.

A. REALNI UVJETI

Realni uvjeti ispitivanja su pri temperaturi 22 °C bez dodatnih utjecaja (vlage, toplinske obrade,...) na uzorke.

1) Ispitivanje vlačne čvrstoće

Statičko vlačno ispitivanje je provedeno na uređaju proizvođača: Heckert, tip: WPM, EU 40 MOD, klasa točnosti: 0,5 sukladno normi HRN EN ISO 7500-1. Uređaj je prikazan na slici 28. Ispitivanja su provedana na pet uzoraka Tonkinovog bambusa i pet uzoraka Ku Zhu (Gorkog) bambusa.

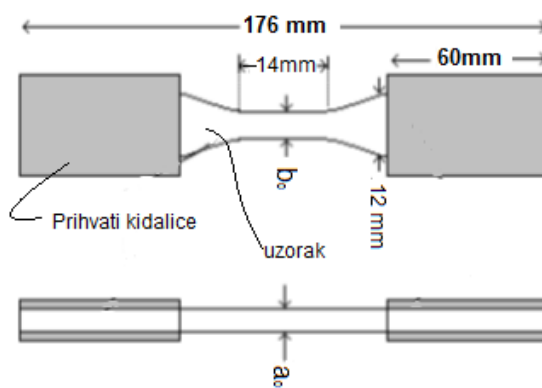


Slika 28. Kidalica EU 40 MOD

Ispitni uzorci Tonkin bambusa prikazani su na slici 29. Uzorci imaju pravokutni presjek te su pripremljeni po uzoru na ispitivanja [48] gdje su slična ispitivanja provedena prema ASTM D143-95 normi. Dimenzije uzorka se nalaze na slici 30. Uzorci su rezani iz cijevi br.2 (Tonkin bambus) i br. 18 (Ku Zhu bambus). Statičko vlačno ispitivanje provedeno je prema normi HRN EN ISO 6892-1 pri 22 °C i brzini opterećenja 10 mm/min.

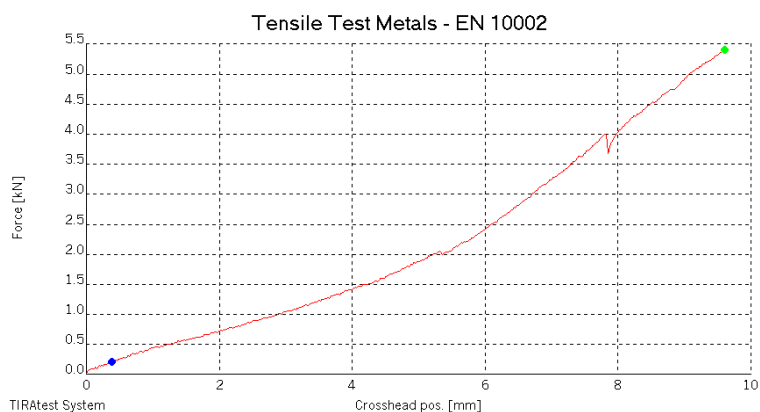


Slika 29. Uzorci spremni za ispitivanje

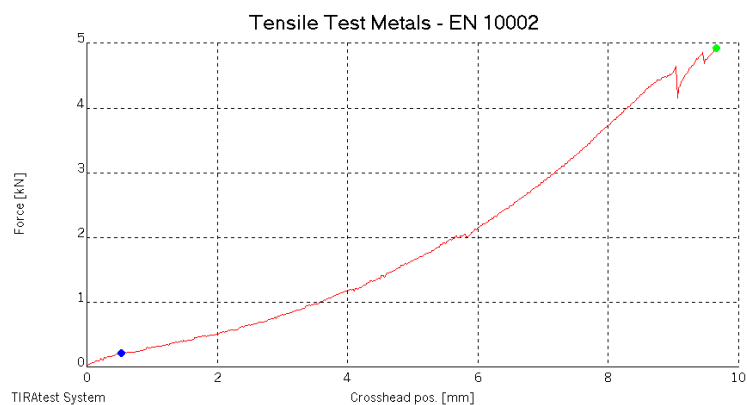


Slika 30. Dimenzije uzorka

Dijagram statičkog vlačnog ispitivanja uzorka oznake 2 – 5 Tonkin bambusa, nalazi na slici 31, dok za uzorak 18 – 3 Ku Zhu bambusa na slici 32.



Slika 31. Statičko vlačno ispitivanje uzorka 2 – 5 Tonkin bambus



Slika 32. Statičko vlačno ispitivanje uzorka 18 – 3 Ku Zhu bambus

Na slikama 31 i 32 su dijagrami koji pokazuju najvišu silu koju je uzorak 2 – 5, odnosno 18 – 3 podnio. Rezultati ispitivanja za Tonkinov bambus prikazani su u tablici 5, dok su za Ku Zhu bambus u tablici 6 (a_0 – debljina presjeka [mm], b_0 – širina presjeka [mm], S_0 – površina presjeka [mm²], F_m – maksimalna sila [N], R_m – vlačna čvrstoća [N/mm²]).

Tablica 5. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za Tonkin bambus

Redni broj	Oznaka uzorka	a_0 [mm]	b_0 [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	R_m [N/mm ²]
1.	2-1	3,78	5,58	21,09	4645	220,22
2.	2-2	4,04	5,48	22,14	4766	215,27
3.	2-3	4,43	5,53	24,5	4465	182,26
4.	2-4	4,33	4,99	21,61	4064	188,09
5.	2-5	3,99	5,5	21,95	5402	246,16
Prosjek	→	4,114	5,416	22,258	4668,4	210,4

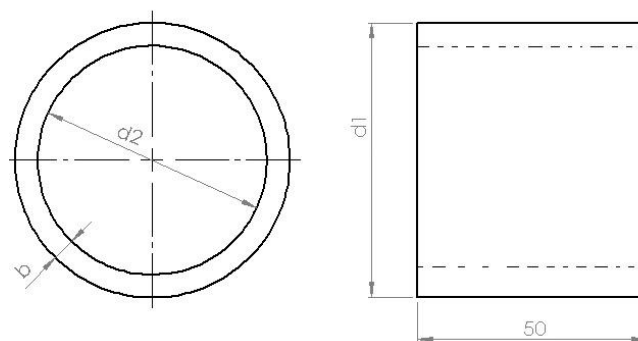
Tablica 6. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za Ku Zhu bambus

Redni broj	Oznaka uzorka	a_0 [mm]	b_0 [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	R_m [N/mm ²]
1.	18-1	4,35	5,35	23,27	4520	194,22
2.	18-2	4,27	5,35	22,84	4271	186,96
3.	18-3	4,67	5,3	24,75	4915	198,58
4.	18-4	4,48	5,38	24,1	4815	199,77
5.	18-5	4,66	5,2	24,23	4564	188,35
Prosjek	→	4,486	5,316	23,838	4617	193,58

Proučavajući dijagrame na slikama 31 i 32 te vrijednosti u tablicama 5 i 6 može se uočiti da je Tonkinov bambus podnio više sile nego Ku Zhu bambus. Ovime se potvrđuju navodi prema kojima se mehanička svojstva razlikuju među vrstama bambusa. Prema rezultatima priloženim u tablicama 5 i 6 vidljivo je da prosječna vlačna čvrstoća Tonkinovog bambusa iznosi 210 N/mm², a za Ku Zhu bambus iznosi oko 194 N/mm². Jednostavnim izračunom dobije se podatak da je vlačna čvrstoća Tonkinovog bambusa za 8 % viša od vlačne čvrstoće Ku Zhu bambusa.

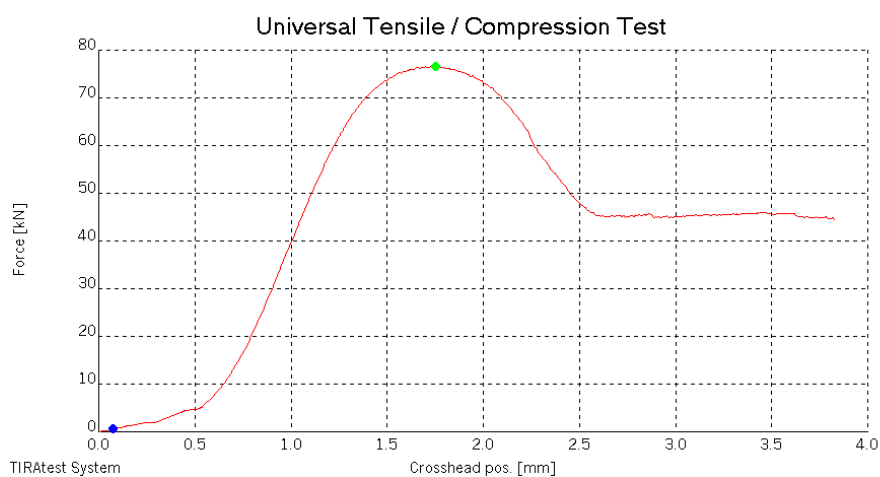
2) Ispitivanje tlačne čvrstoće

Statičko tlačno ispitivanje je provedeno na uređaju proizvođača: Heckert, tip: WPM, EU 40 MOD, klasa točnosti: 0,5. Ispitano je 5 uzoraka Tonkin bambusa cijevi broj 1 te 5 uzoraka Ku Zhu bambusa cijevi broj 18 pri sobnoj temperaturi uz brzinu 5 mm/min. Uzorci su duljine 50 mm uz proizvoljne (nedefinirane) promjere. Dimenzije uzorka prikazane na slici 33.

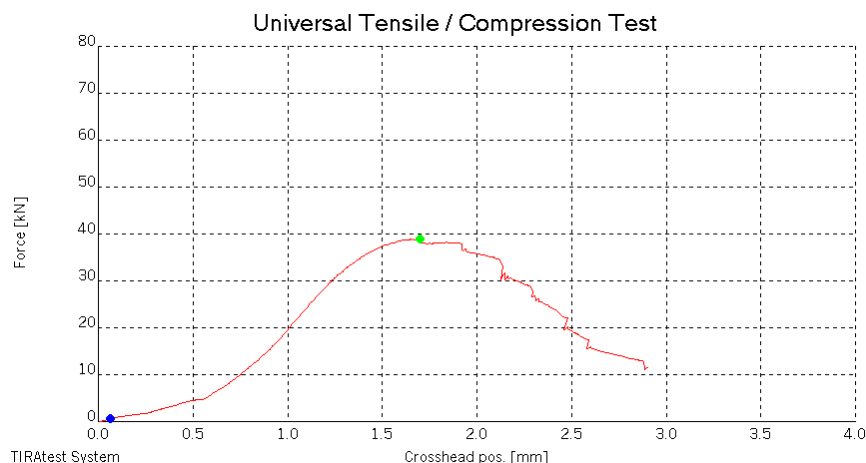


Slika 33. Dimenzije uzorka ispitivanog na tlačno opterećenje

Dijagram statičkog vlačnog ispitivanja na uzorcima oznake 1–5 Tonkin bambus, nalazi na slici 34, dok za uzorak 18–T–3 Ku Zhu bambusa na slici 35.



Slika 34. 1-5 Uzorak Tonkinovog bambusa ispitan na tlačno opterećenje



Slika 35. 18-T-5 Uzorak Ku Zhu bambusa ispitan na tlačno opterećenje

Dijagrami koji pokazuju maksimalnu silu koju su uzorci 1 – 5 i 18-T-5 podnjeli prikazani su na slikama 34 i 35. Rezultati statičko tlačnog ispitivanja prikazani su u tablici 7 za Tonkinov bambus, dok su za Ku Zhu bambus prikazani u tablici 8 (d_1 – vanjski promjer [mm], d_2 – unutarnji promjer [mm], S_0 – površinu presjeka [mm²], F_m – maksimalna sila [N], σ_t – tlačna čvrstoća [N/mm²]).

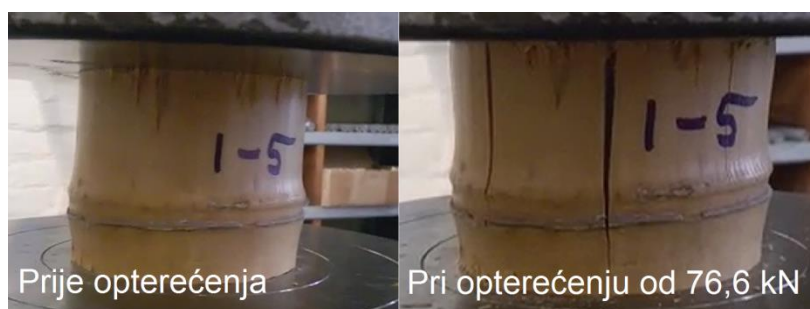
Tablica 7. Rezultati statičkog tlačnog ispitivanja za Tonkinov bambus

Redni broj	Oznaka uzorka	d_1 [mm]	d_2 [mm]	S_0 [mm]	F_m [N]	σ_t [N/mm ²]
1.	1-1	62,8	53,0	891,303	69230	77,673
2.	1-2	62,7	53,5	839,624	65150	77,594
3.	1-3	62,5	52,8	878,399	62900	71,608
4.	1-4	61,8	52,2	859,542	62330	72,515
5.	1-5	61,7	52,5	825,173	76610	92,841
Prosjek	→	62,3	52,8	858,8	67200	78,4

Tablica 8. Rezultati statičkog tlačnog ispitivanja za Ku Zhu bambus

Redni broj	Oznaka uzorka	d_1 [mm]	d_2 [mm]	S_0 [mm]	F_m [N]	σ_t [N/mm ²]
1.	18-T-1	40,5	31,5	508,939	43140	84,765
2.	18-T-2	40,0	32,1	447,356	40880	91,381
3.	18-T-3	40,0	31,8	462,412	38240	82,697
4.	18-T-4	39,8	32,0	439,855	37800	85,937
5.	18-T-5	40,0	31,9	457,409	38950	85,154
Prosjeak	→	40,1	31,9	463,194	39802	85,987

Na slikama 34 i 35, može se uočiti velika razlika u maksimalnim silama. Međutim, kao što je vidljivo iz tablica 7 i 8 Tonkinov bambus ima za trećinu veći vanjski promjer nego Ku Zhu bambus. Izračunom rezultata priloženih u tablicama 7 i 8 vidljivo je da prosječna tlačna čvrstoća Tonkinovog bambusa iznosi oko 78 N/mm², dok za Ku Zhu bambus iznosi 86 N/mm². Stoga, iako je Tonkinov podnio veća opterećenja, zbog razlike u promjeru Ku Zhu bambus ima višu prosječnu tlačnu čvrstoću za oko 9 %. Također, vidljiva su odstupanja pri mjerenju. Naime uzorci 1-5 i 18-T-2 pokazuju znatno više iznose od prosjeka. Tlačna čvrstoća uzorka 1-5 iznosi 93 N/mm², prosjek je oko 78 N/mm². Ostupanje je posljedica postojanja čvora koji povećava mehanička svojstva. Povećanje tlačne čvrstoće uzorka 1-5 s čvorom u odnosu na uzorke bez čvora iznosi oko 16 %. Na slici 36 prikaz je uzorak 1-5 prije i nakon opterećenja te prikazan je lom.

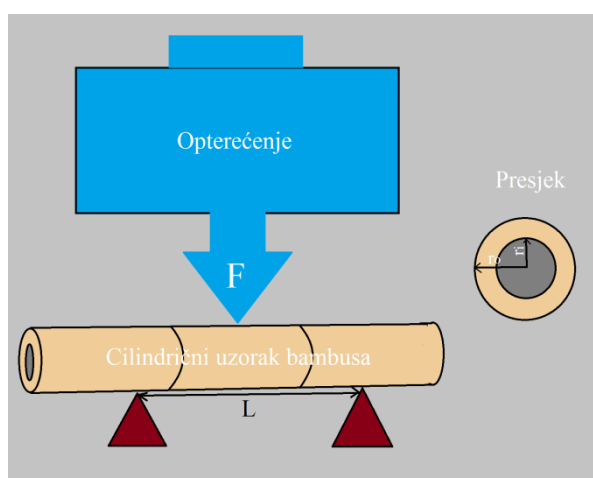


Slika 36. Tlačno opterećen uzorak 1-5

Na slici 36 prikazan je opterećen uzorak 1-5 te pojava loma pri opterećenju 76 600 N. Čvor na uzorku vidljivo povisuje tlačnu čvrstoću.

3) Savojna čvrstoća

Ispitivanje savijanja provedeno je po uzoru na ispitivanje [54] metodom „tri točke“ na uređaju proizvođača: Heckert, tip: WPM, EU 40 MOD, klasa točnosti: 0,5. Ispitivanje je provedeno na 3 uzorka Tonkin bambusa cijevi broj 13 te 3 uzorka Ku Zhu bambusa cijevi broj 25 pri sobnoj temperaturi uz brzinu 5 mm/min. Uzorci su duljine 200 mm uz proizvoljne promjere. Metodom „tri točke“, prikazanoj na slici 37, uzorak je stavljen na dvije stabilne točke između kojih je razmak $L = 76$ mm te opterećujemo uzorak na $L/2$ sa silom.



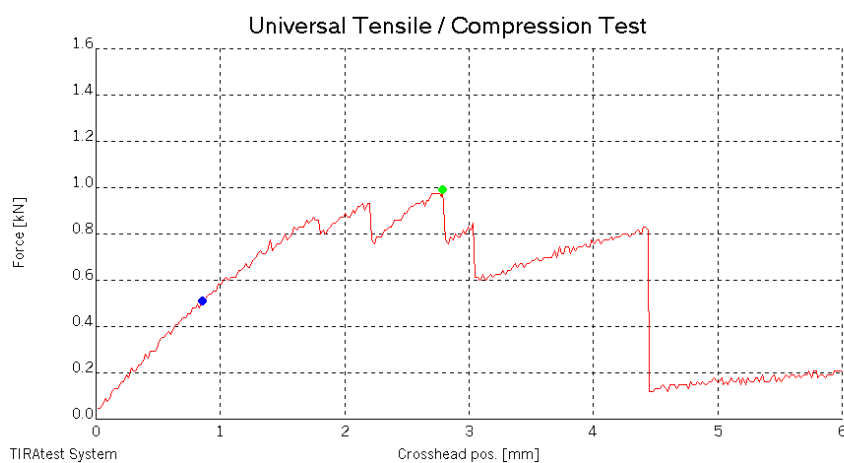
Slika 37. Metoda ispitivanja savojne čvrstoće

Savojnu čvrstoću određujemo prema formuli (1):

$$\sigma_s = \frac{My}{I}$$

Gdje je σ_s savojna čvrstoća [N/mm^2], M moment koji se javlja u $L/2$ -točki [Nmm], y udaljenost centra uzorka do površine djelovanja sile [mm] te I polarni moment inercije [mm^4]. Mjerenjem vanjskog r_0 [mm] i unutarnjeg radijusa r_1 [mm] imamo sve potrebne podatke za izračun savojne čvrstoće. Savijanje uzorka 13-1 prikazano je na slici 38. Rezultati su prikazani u tablici 9 za Tonkinov bambus i u tablici 10 za Ku Zhu bambus. Na slici je prikazan dijagram savojnog opterećenja (l – duljina uzorka [mm], r_0 – vanjski radijus [mm],

r_i – unutarnji radijus [mm], d – vanjski promjer [mm], M – moment [Nmm], I – polarni moment inercije [mm⁴], F_m – maksimalna sila [N], σ_s – savojna čvrstoća [N/mm²]).



Slika 38. Savijanje uzorka 13-1

Tablica 9. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće Tonkin bambusa

Redni broj	Oznaka uzorka	l [mm]	r_0 [mm]	r_i [mm]	F_m [N]	d [mm]	M [Nmm]	I [mm ⁴]	σ_s [N/mm ²]
1.	13-1	197	11,60	8,25	990	23,20	18810	10582,4	20,62
2.	13-2	199	11,05	8,60	970	22,10	18430	7413,3	27,47
3.	13-3	202	11,05	8,85	1160	22,10	22040	6891,6	35,34
Prosjek	→	199,3	11,23	8,57	1040	22,47	19760	8295,8	27,81

Tablica 10. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće Ku Zhu bambusa

Redni broj	Oznaka uzorka	l [mm]	r_0 [mm]	r_i [mm]	F_m [N]	d [mm]	M [Nmm]	I [mm ⁴]	σ_s [N/mm ²]
1.	25-1	201	12,06	7,90	2440	24,1	47310,0	13555,1	42,09
2.	25-2	198	11,60	7,93	1870	23,2	35530,0	11114,9	37,08
3.	25-3	201	11,60	7,85	1510	23,2	28690,0	11238,3	29,61
Prosjek	→	200	11,75	7,89	1940	23,5	37176,67	11969,4	36,26

Rezultati savojne čvrstoće su znatno niži nego iz literature [37, 48, 49, 53] gdje su ispitivani uzorci pravokutnog presjeka, a ne cijela cijev kao u ovom radu, dok je u radu [54] ispitana cijev i uočen ovakav način loma. Prema dijagramu iz slike 38 možemo primjetiti da pri

opterećenju 990 N počinje lom, nakon čega dolazi do naglog pada sile, ali zatim sila raste nakon čega dolazi do konačnog pada sile. Na slici 39 je prikazan poprečni presjek uzorka Ku Zhu bambusa opterećen na savijanje. Na slici 40 prikazan je uzorak 13-2 Tonkinov bambus. Na slikama 39 i 40 se vidi nepotpun lom uzoraka.



Slika 39. Lom uslijed savijanja uzorak 25-3



Slika 40. Lom uslijed savijanja uzorak 13-2

4) Izvijanje

Ispitivanje izvijanja proveden je na uređaju proizvođača: Heckert, tip: WPM, EU 40 MOD, klasa točnosti: 0,5. Tri uzorka su ispitivana cijevi broj 5, 8 i 11 Tonkin bambusa pri sobnoj temperaturi uz brzinu 5,7,10 mm/min. Zbog nedostatka ispitnog materijala Ku Zhu bambus nije ispitan. Uzorci su duljine 520 mm uz proizvoljne promjere, izbor duljine je određen po duljini cijevi sjedala okvira bicikla jer je cijev sjedala opterećena na izvijanje. Ispitivanje uzorka prikazano je na slici 41.



Slika 41. Ispitivanje uzorka 5

Rezultati provedenog ispitivanja nalaze u tablici 11 (l – duljina uzorka [mm], d_1 – vanjski promjer [mm], d_2 – unutarnji promjer [mm], v – brzina opterećenja [mm/min], F_k – sila izvijanja [N], A – površina presjeka [mm²], σ_k – naprezanje izvijanja [N/mm²])

Tablica 11. Rezultati ispitivanja na izvijanje

Uzorak	l [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	v [mm/min]	F_k [N]	A [mm ²]	σ_k [N/mm ²]
5	520,0	53,00	39,0	10,0	34500	1011,59	34,10
8	520,0	41,55	31,9	7,0	32850	556,68	59,01
11	520,0	24,75	16,8	5,0	13200	259,43	50,88
Prosjek	520	39,77	29,23	7,33	26850	609,24	48,00

Iz tablice se može zaključiti da je se cijev sjedala može opteretiti je do 48 N/mm² tj. s vanjskim promjerom cijevi 39,77 mm treba se djelovati silom u iznosu od 26850 N da bi došlo do loma. Također, može se primjetiti da promjer nema direktnog utjecaja na iznos naprezanja izvijanja. Posljedica ispitivanja uzorka 5 prikazana je na slici 42.



Slika 42. Izvijanje uzorka 5

5) Tvrdća

Ispivanje tvrdoće provedeno je u Laboratoriju za polimere i kompozite, FSB na uređaju Zwick & Co. KG. Model 3106, prema DIN 53456 normi. Izrezani uzorci cijevi 1 i 18 opterećeni su kuglicom promjera 10 mm sa silom od 132,39 N. Ispitivanje je ponavljano 10 puta za svaki od uzoraka. Mjerena je tvrdoća na 10, 30 i 60 sekundi. Ispitivanje je prikazano na slici 43.



Slika 43. Ispitivanje tvdoće bambusa

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablicama 12 i 13 gdje su očitani rezultati dubina prodiranja metalne kuglice u uzorak. Izračunom prema izrazu (2) :

$$H_k = \frac{1}{D\pi} \frac{F}{(h-k)} \quad (2)$$

gdje je H_k – tvrdoća [N/mm^2], F – sila utiskivanja [N], D – promjer metalne kuglice [mm], h – dubina utiskivanja [mm], k – korekcija.

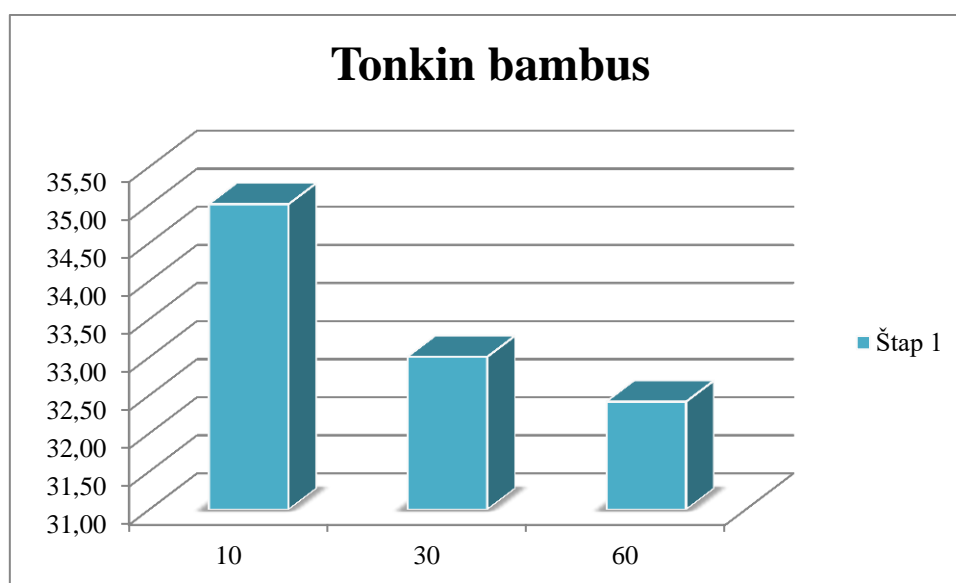
Tablica 12. Rezultati ispitivanja tvrdoće Tonkinovog bambusa

TONKIN BAMBUS						
Sila utiskivanja $F = 132,39 \text{ N}$; korekcija = 0,015						
10 sec		30 sec		60 sec		
	očitavanje [mm]	tvrdoća [N/mm^2]	očitavanje [mm]	tvrdoća [N/mm^2]	očitavanje [mm]	tvrdoća [N/mm^2]
1.	0,185	24,92	0,190	24,21	0,195	23,54
2.	0,120	40,35	0,120	40,35	0,125	38,51
3.	0,125	38,51	0,130	36,84	0,130	36,84
4.	0,110	44,59	0,145	32,59	0,145	32,59
5.	0,135	35,30	0,135	35,30	0,140	33,89
6.	0,145	32,59	0,150	31,38	0,150	31,38
7.	0,140	33,89	0,145	32,59	0,145	32,59
8.	0,120	40,35	0,125	38,51	0,125	38,51
9.	0,140	33,89	0,145	32,59	0,150	31,38
10.	0,180	25,68	0,180	25,68	0,185	24,92
	S	35,01	S	33,00	S	32,42

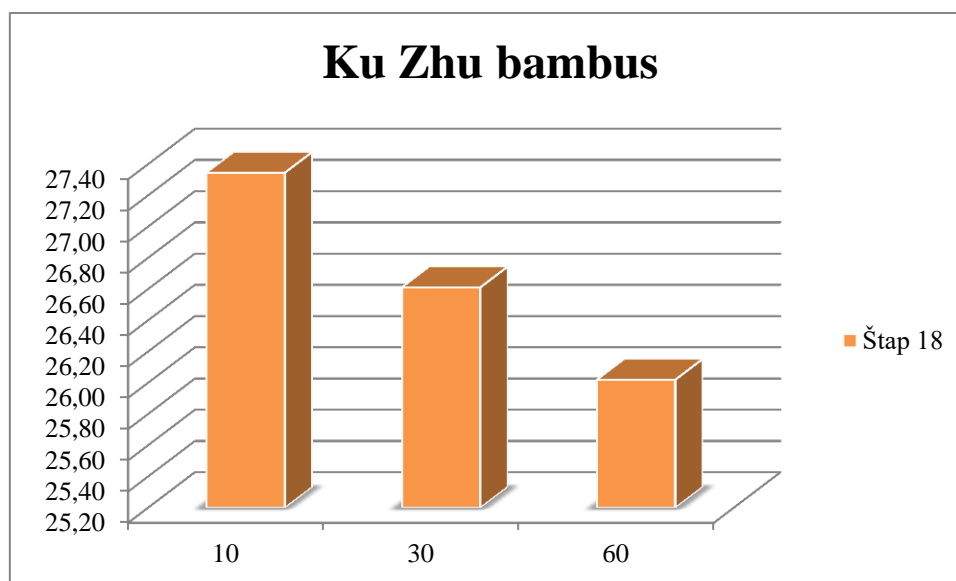
Tablica 13. Rezultati ispitivanja tvrdoće Ku Zhu bambusa

KU ZHU BAMBUS						
Sila utiskivanja $F = 132,39 \text{ N}$; korekcija = 0,015						
	10 sec		30 sec		60 sec	
	očitanje [mm]	tvrdoća [N/mm ²]	očitanje [mm]	tvrdoća [N/mm ²]	očitanje [mm]	tvrdoća [N/mm ²]
1.	0,200	22,90	0,205	22,30	0,205	22,30
2.	0,195	23,54	0,200	22,90	0,205	22,30
3.	0,215	21,18	0,220	20,67	0,225	20,17
4.	0,250	18,03	0,250	18,03	0,255	17,65
5.	0,160	29,22	0,165	28,24	0,165	28,24
6.	0,135	35,30	0,140	33,89	0,145	32,59
7.	0,150	31,38	0,150	31,38	0,155	30,26
8.	0,155	30,26	0,160	29,22	0,165	28,24
9.	0,150	31,38	0,155	30,26	0,160	29,22
10.	0,155	30,26	0,160	29,22	0,160	29,22
	S	27,35	S	26,61	S	26,02

Rezultati su prikazani grafički na slikama 44 i 45 gdje je prikazana usporedba prosječnih vrijednosti tvrdoće nakon 10, 30 i 60 sekundi.



Slika 44. Grafički prikaz rezultata Tonkinovog bambusa



Slika 45. Grafički prikaz rezultata Ku Zhu bambusa

Prema rezultatima dobivenim iz tablica 44 i 45 prosječna tvrdoća nakon 60 sekundi je oko 32 N/mm² za Tonkinov bambus te 26 N/mm² za Ku Zhu bambus. Tvrdoća Tonkinovog bambusa je za oko 20 % veća. Također, može se primjetiti linearni pad tvrdoće, između rezultata nakon 10 i nakon 60 sekundi, za oko 7 % kod Tonkinovog bambusa. Kod Ku Zhu bambusa taj pad je malo manji od 5 %.

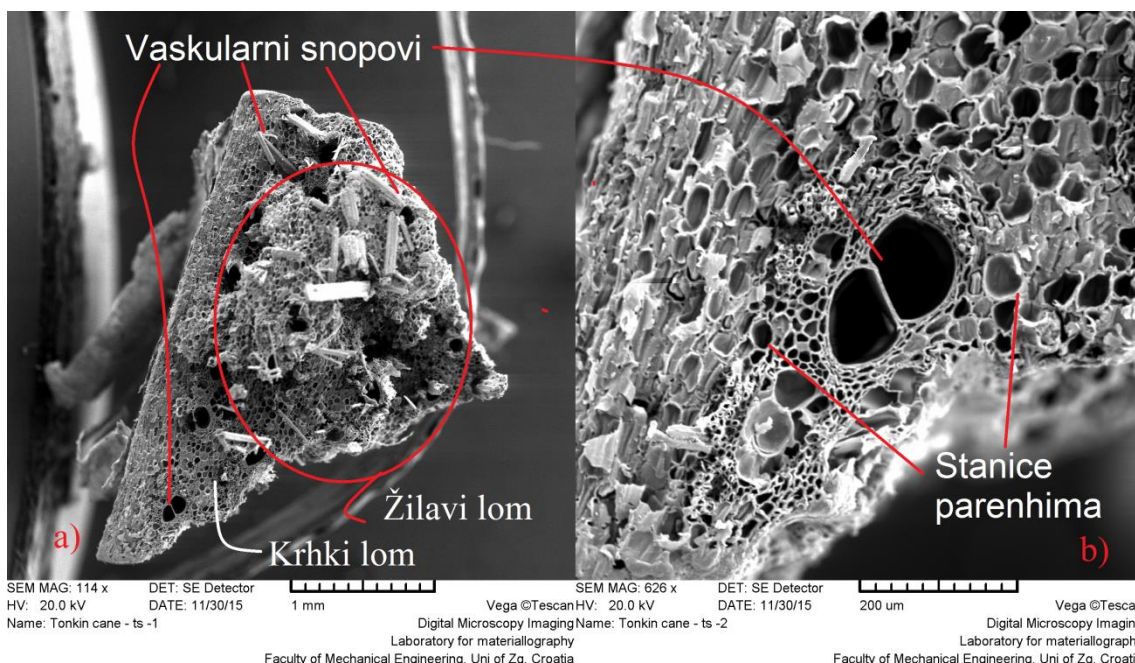
6) Mikrostruktura nakon loma

Proučavanje mikrostrukture bambusa provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju, FSB, Sveučilište u Zagrebu. Svrha ovog ispitivanja je detaljniji uvid u promjena koje nisu oku vidljive. Za proučavanje odabrani su lomovi uzoraka 2-1 i 18-2 koji su bili vlačno optrećeni. Uzorak se izrezuje, iz lomljenog dijela 2-1 uzorka te 18-2, ručnom pilom bez hlađenja. Bambus je organskog podrijetla i nije vodljiv materijal te potrebno ga je naporiti vodljivim materijalom kako bi se mogla proučavati njegova struktura. Nakon izrezivanja uzorci se postavljaju u uređaj EMITECH gdje se naparuje sa paladijem i zlatom u trajanju od 120 sekundi. Uređaj EMITECH prikazan je na slici 46.

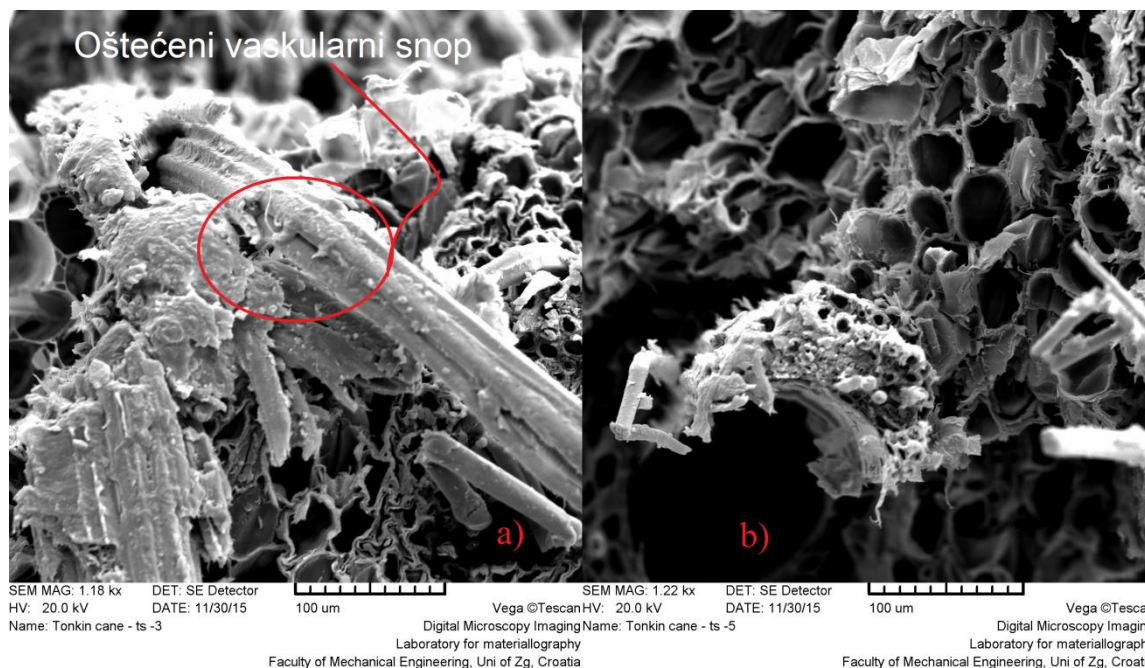


Slika 46. Emitech uređaj

Uzorci su se analizirali na SEM-u (eng. *scanning electron microscope*) uređaju TESCAN VEGA 5136 MM. Skening elektronski mikroskop radi pod vakuumom između 10^{-2} do 10^{-8} Pa. Pomoću sistema leća elektroni se usmjeravaju prema površini uzorka. Razlučivanje i dubina prodiranja ovise o materijalu uzorka, naponu i veličini spota (presjek snopa na mjestu dodira s uzorkom). Upadni elektroni vraćaju se kao primarno raspršeni prema natrag (eng. „*backscattered electrons*“) razlika u sastavu ili kao sekundarni elektroni koji se najviše koriste za topografije površina. Na slikama 47 i 48 se nalazi uzorak 2-1 prikazan pod SEM mikroskopom.



Slika 47. Prikaz prijeloma uzorka 2-1 a) krhki i žilavi lom; b) prikaz stanica parenhima

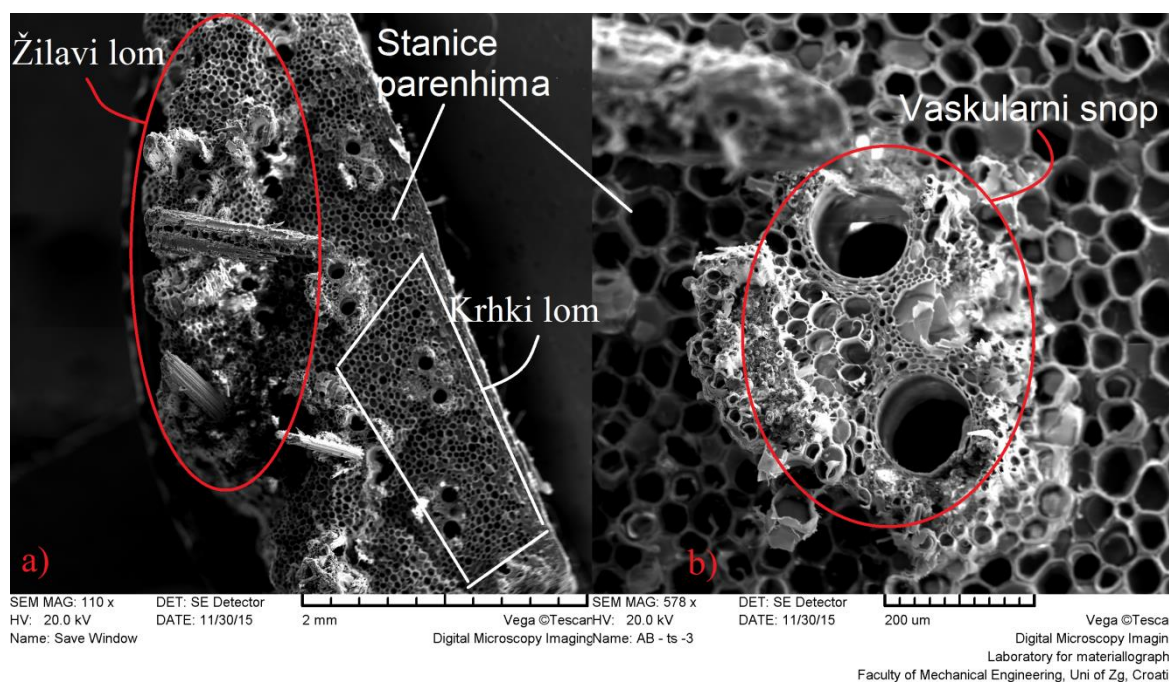


Slika 48. Uvećani prikaz prijeloma uzorka 2-1 a) oštećenje vaskularnog snopa; b) oštećenje parenhima i vlakana

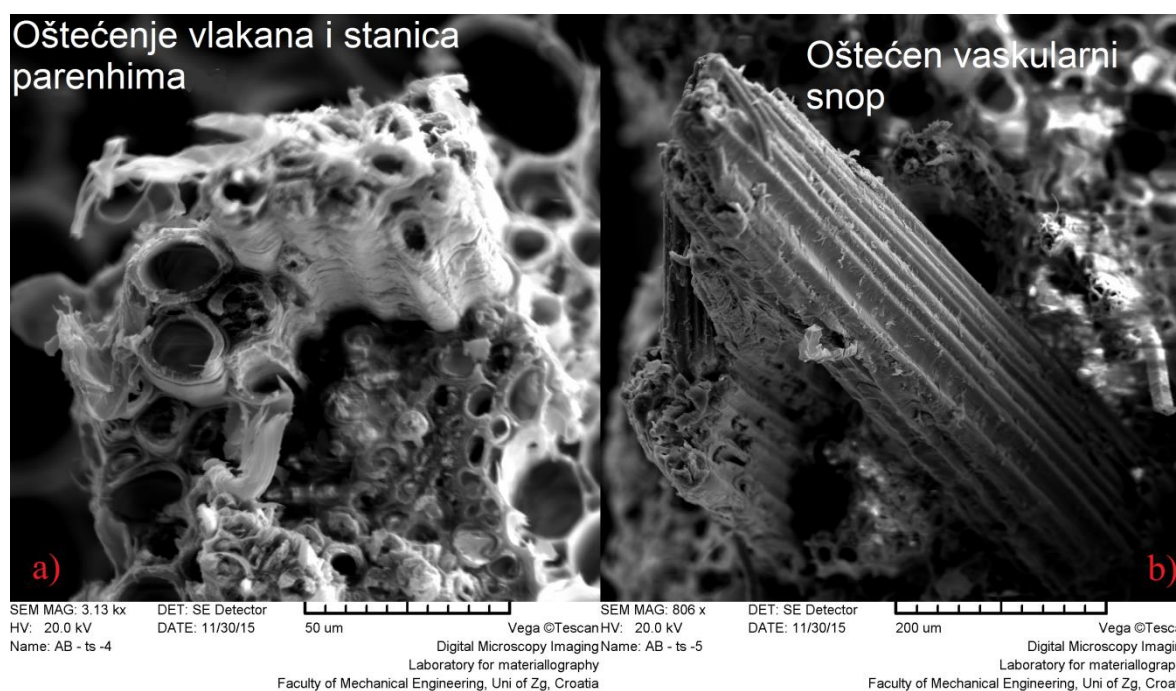
Na slikama 47 i 48 je prikazan lom uzorka 2-1 nastao nakon vlačnog opterećenja. Na slici 47 a) uzorak je uvećan 114 puta vidljiv je prijelom uzorka te mogu se uočiti vaskularni snopovi. Također, može se uočiti pojava krhkog i žilavog loma. Na slici 47 b) s povećanjem 626 puta vide se i stanice parenhima. Na slici 48 a) povećanje 1180 puta uočavaju se oštećenja vaskularnog snopa, a na slici 48 b) uz povećanje 1220 puta oštećenje vlakana, vaskularnih snopova i stanica parenhima.

Iz slika 47 a) i b) te slika 48 a) i b) može se zaključiti da prilikom loma uzorka 2-1 dolazi do nepravilnog loma vaskularnih snopova, vlakana i deformacije ksilema tj. stanica parenhima. Pojavljuju se žilavi i krhki lom, što je inače pojava karakteristična za mnoge metale.

Na slikama 49 i 50 se nalazi uzorak 18-2 prikazan pod SEM mikroskopom.



Slika 49. Prikaz prijeloma uzorka 18-2 a) krhki i žilavi lom; b) prikaz vaskularnog snopa



Slika 50. Uvećan prikaz prijeloma uzorka 18-2 a) oštećenje parenhima i vlakana; b) oštećenje vaskularnog snopa

Slike 49 a) i b) te slike 50 a) i b) daju uvid u mikrolomove koji nastaju na vaskularnim snopovima, vlaknima i deformacije na ksilemu. Na slici 49 a) prikazan je lom uzorak 18-2 Ku Zhu bambusa s povećanjem od 110 puta. Kao i kod uzorka 2-1 Tonkinovog bambusa vidljiva je pojava krhkog i žilavog loma. Na slici 49 b) s povećanjem od 578 puta prikazan je vaskularni snop. Iz slike se može jasno viditi razlika između oblika i rasporeda vaskularnih snopova Tonkinovog i Ku Zhu bambusa. Na slici 50 a) pri povećanju 3130 puta vidljiva su oštećenja vlakana i stanica parenhima., dok je na slici 50 b) pri povećanju 808 puta prikazan oštećeni vaskularni snop.

B. UTJECAJ VLAGE NA SVOJSTVA BAMBUSA

Drugi dio ispitivanja zahtjeva izlaganje uzoraka u vlažnim uvjetima kako bi se proučavala mehanička svojstva i njihove promjene. Ispitivanje je provedeno prema normi EN 1910:2000. Uzorci su bili izloženi relativnoj vlažnosti $65 \pm 5 \%$ i temperaturi $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ u trajanju od 21 dan. S obzirom da su cijevi bambusa šuplje, krajevi su bili zatvoreni folijom kako bi se bolje simulirali realni uvjeti tj. da vlaga prodire kroz samo vanjsku stijenku. Prije samog stavljanja u vlažnu komoru, izmjerena je masa uzoraka. Mjerenje je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala, FSB na KERN ABS analitičkoj vagi, čitljivost 0,1mg te kapaciteta 220 g. Dok su uzorci 1 i 3-A mjereni na KERN EMB 2200-0, kapaciteta 2200 grama. Na slici 51 je prikazano vaganje uzoraka. Nakon mjerenja mase uzorci su postavljeni u vlažnu komoru kako je prikazano na slici 52.



Slika 51. Vagaje uzoraka



Slika 52. Uzorci u vlažnoj komori

Nakon 21 dan uzorci su izvađeni te vagani na KERN ABS analitičkoj vagi, čitljivost 0,1mg te kapaciteta 220 g, a uzorci 1 i 3-A vagani su na METTLER TOLEDO čitljivosti 0,001 g te kapaciteta 1210 g. Izmjereni i izračunati podaci nalaze se u tablicama 14 i 15 gdje je prikazana masa (u gramima) izmjerena prije stavljanja uzoraka u vlažnu komoru, masa poslije vlažne komore (u gramima), Δm – promjena mase tj. masa vlage koja se akumulirala tijekom izlaganja u vlažnoj komori, $w(H_2O)$ - je maseni udio akumulirane vlage (ne predstavlja ukupni maseni udio vlage u bambusu jer iako je uzorak osušen sadržava vlagu) i postotak promjene vlage u uzorku.

Tablica 14. Promjena mase uzoraka Tonkin bambusa

Uzorak	Masa prije, g	Masa poslije, g	Δm , g	$w(H_2O)$	Promjena vode, %
1	279,0000	280,9400	1,9400	0,006905	0,6905
3-A	251,0000	252,8540	1,8540	0,007332	0,7332
3-B	189,8315	191,1598	1,3283	0,006949	0,6949
9-A	92,5486	93,1733	0,6247	0,006705	0,6705
9-B	72,8660	73,2951	0,4291	0,005854	0,5854

Tablica 15. Promjena mase uzoraka Ku Zhu bambusa

Uzorak	Masa prije, g	Masa poslije, g	Δm , g	w(H ₂ O)	Promjena vode, %
22-A	167,1008	168,1640	1,0632	0,006322	0,6322
22-B	159,0261	159,9592	0,9331	0,005833	0,5833
24-A	58,8118	59,0454	0,2336	0,003956	0,3956
24-B	47,2508	47,4816	0,2308	0,004861	0,4861

Iz tablica 14 i 15 je vidljiva promjena mase uzoraka. Kod Tonkin bambusa zabilježen je najveći porast mase kod uzorka 3-A za 0,73 %, kod Ku Zhu bambusa porast za uzorak 22-A iznosi 0,63 %. Stoga se može zaključiti da nije došlo do značajnijeg porasta mase tijekom izlaganja u zadanim uvjetima. Međutim, kako bi se analizirala promjena mehaničkih svojstava nakon izlaganja uzoraka u vlažnoj komori napravljena su ispitivanja statičko vlačnog ispitivanja, statičko tlačnog ispitivanja te savijanje u tri točke. Opis i rezultati tih ispitivanja nalaze se u narednim poglavljima.

1) Ispitivanje vlačne čvrstoće

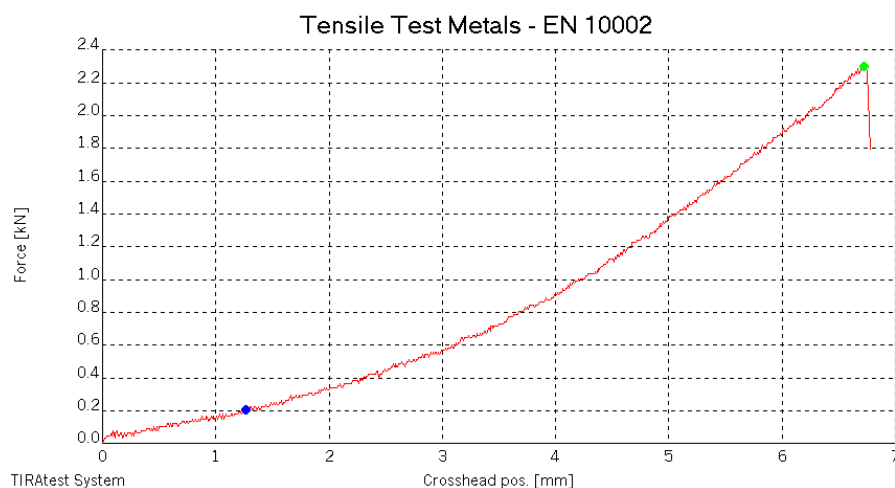
Statičko vlačno ispitivanje je provedeno na uređaju proizvođača: Heckert, tip: WPM, EU 40 MOD, klasa točnosti: 0,5. Ispitivanja su provedena na šest uzoraka Tonkinovog bambusa i pet uzoraka Gorkog bambusa, nakon što su uzorci prethodno bili izloženi 21 dan u vlažnoj komori pri temperaturi 20 ± 2 °C te vlažnosti 65 ± 5 %.

Uzorci imaju pravokutni presjek te pripremljeni su po uzoru na dosadašnja ispitivanja te ispitivanja [48], gdje su slična ispitivanja provedena prema ASTM D143-95 normi. Uzorci su rezani iz cijevi br.1 (tonkin bambus) i br. 22 (gorki bambus). Statičko vlačno ispitivanje napravljeno je prema HRN EN ISO 6892-1 normi pri 22 °C i brzini opterećenja 10 mm/min. Na slici 53 je prikazan uzorak u procesu ispitivanja.

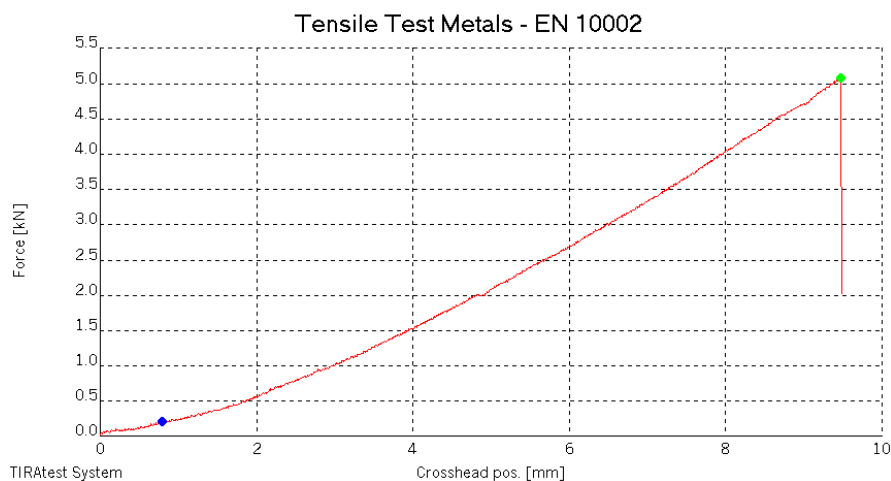


Slika 53. Vlačno opterećeni uzorak

Dijagram statičko vlačnog ispitivanja uzorka oznake 1-A-4 tonkonov bambus, nalazi na slici 54, za uzorak 22-B-3 Ku Zhu bambusa na slici 55.



Slika 54. Dijagram uzorka 1-A-4



Slika 55. Dijagram uzorka 22-B-3

Na dijagramima sa slika 54 i 55 prikazana su optrećenja koju su uzorci 1-A-4 i 22-B-3 podnijeli. Prema dijagramu uzorak 1-A-4 podnio je optrećenje u iznosu od 2296 N, uzorak 22-B-3 podnio 5070 N. U tablica 16 i 17 prikazani su rezultati mjerenja gdje je a_0 – debljina presjeka [mm], b_0 – širina presjeka [mm], S_0 – površina presjeka [mm²], F_m – maksimalna sila [N], R_m – vlačna čvrstoća [N/mm²].

Tablica 16. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće Tonkin bambusa nakon vlažne komore

Redni broj	Oznaka uzorka	a_0 [mm]	b_0 [mm]	S_0 [mm]	F_m [N]	R_m [N/mm ²]
1.	1-A-1	4,49	5,40	24,25	5414,0	223,29
2.	1-A-2	4,20	5,38	22,60	4854,0	214,82
3.	1-A-3	3,98	5,10	20,30	2092,0	103,06
4.	1-A-4	3,85	5,22	20,10	2296,0	114,25
5.	1-A-5	3,95	5,27	20,82	4884,0	234,62
6.	1-A-6	4,02	5,24	21,06	3072,0	145,84
Prosjeck	→	4,08	5,27	21,52	3768,7	172,65

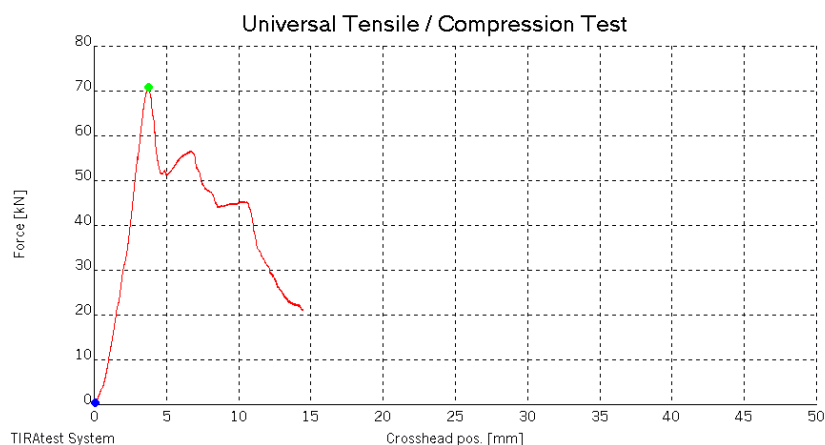
Tablica 17. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće Ku Zhu bambusa nakon vlažne komore

Redni broj	Oznaka uzorka	a_0 [mm]	b_0 [mm]	S_0 [mm]	F_m [N]	R_m [N/mm ²]
1.	22-B-1	6,70	4,76	31,89	5327,0	167,03
2.	22-B-2	5,93	5,30	31,43	6260,0	199,18
3.	22-B-3	6,42	5,38	34,54	5070,0	146,79
4.	22-B-4	6,26	5,28	33,05	3758,0	113,70
5.	22-B-5	6,20	4,81	29,82	4474,0	150,02
Prosjek	→	6,30	5,11	32,15	4977,8	155,34

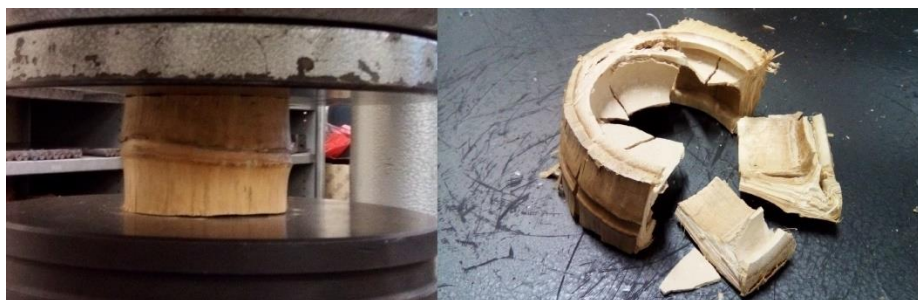
Rezultati mjerenja, nakon utjecaja vlažnih uvjeta prikazani su u tablicama 16 i 17 te pokazuju da je prosječna vrijednost vlačne čvrstoće Tonkin bambusa oko 173 N/mm², a za Ku Zhu bambus oko 155 N/mm² tj. vlačna čvrstoća Tonkin bambusa u prosjeku je viša za oko 10%. Ono što je zanimljivo kod ovog ispitivanja je način pucanja uzoraka. Naime, došlo je do interlaminarnog loma kod uzorka 1-A-3 je, što je netipično pri ovakvom ispitivanju (očekivan je lom po najužem presjeku uzoraka). Stoga, s dodatnim oprezom pri postavljanju uzoraka nastavljeno je ispitivanje. Međutim, došlo je do ponovne pojave interlaminarnog loma kod uzoraka 1-A-4, 1-A-6, 22-B-1, 22-B-2, 22-B-3 i 22-B-5. S obzirom da su ispitivanja provedena s dodatnim oprezom, a pojava ovakvog loma se ponovila u 2/3 ispitanih uzoraka, odbacuje se mogućnost ljudske pogreške pri ispitivanju. Može se zaključiti da je uzrok tome utjecaj vlage tj. eventualno slabljenje veza među vlaknima čime dolazi do loma između vlakana, a ne po presjeku vlakana.

2) Ispitivanje tlačne čvrstoće

Nakon izlaganja uzoraka u vlažnoj komori statičko tlačno ispitivanje je provedeno na uređaju proizvođača: Heckert, tip: WPM, EU 40 MOD, klasa točnosti: 0,5. Ispitano je 3 uzorka Tonkinovog bambusa cijevi broj 1 te 3 uzorka Ku Zhu bambusa cijevi broj 22 pri sobnoj temperaturi uz brzinu 5 mm/min. Uzorci su duljine 50 mm uz proizvoljne promjere. Dimenzije uzoraka prikazane su u tablici. Na slici 56 prikazan je dijagram statičkog tlačnog ispitivanja nakon vlažne komore za uzorak oznake 1-A-3T Tonkonov bambus, a na slici 57 je taj isti uzorak prije i nakon opterećenja.



Slika 56. Dijagram uzorka 1-A-3T



Slika 57. Uzorak 1-A-3T

Rezultati tlačnog ispitivanja prikazani su u tablici 18 za Tonkin bambus, dok su za Ku Zhu bambus prikazani u tablici 19 gdje je d_1 – vanjski promjer [mm], d_2 – unutarnji promjer [mm], S_0 – površinu presjeka [mm²], F_m – maksimalna sila [N], σ_t – tlačna čvrstoća [N/mm²].

Tablica 18. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće Tonkinovog bambusa nakon vlažne komore

Redni broj	Oznaka uzorka	d_1 [mm]	d_2 [mm]	S_0 [mm]	F_m [N]	σ_t [N/mm ²]
1.	1-A-T	60,30	50,96	816,16	44570,00	54,61
2.	1-A-2T	60,43	51,40	793,12	45090,00	56,85
3.	1-A-3T	61,01	50,62	910,93	70750,00	77,67
Prosjek	→	60,58	50,99	840,07	53470,00	63,04

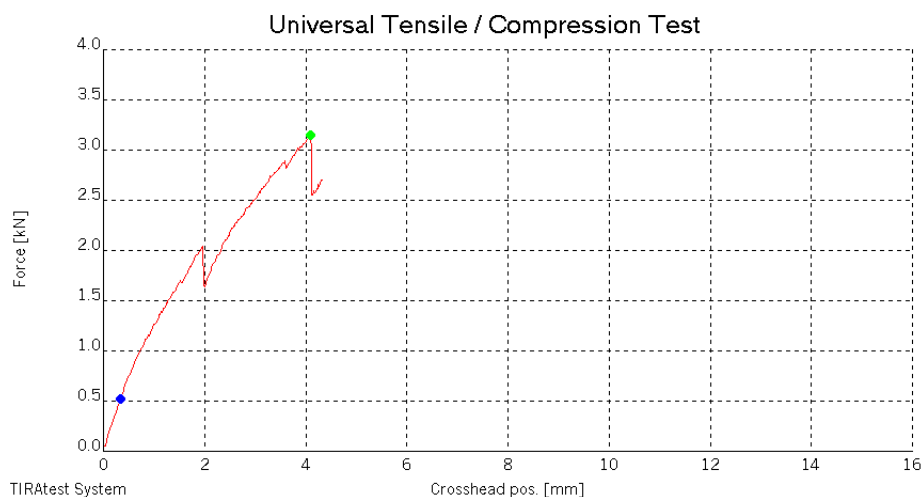
Tablica 19. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće Ku Zhu bambusa nakon vlažne komore

Redni broj	Oznaka uzorka	d_1 [mm]	d_2 [mm]	S_0 [mm]	F_m [N]	σ_t [N/mm ²]
1.	22-B-T	39,65	27,80	627,76	43980,0	70,06
2.	22-B-2T	39,11	27,08	625,39	40100,0	64,12
3.	22-B-3T	39,55	27,48	635,43	45930,0	72,28
Prosjek	→	39,44	27,45	629,52	43336,67	68,82

Vidljivo je iz rezultata priloženih u tablicama 18 i 19 da prosječna tlačna čvrstoća Tonkinovog bambusa iznosi 63 N/mm^2 , dok za Ku Zhu bambus iznosi skoro 69 N/mm^2 . Tonkinov podnio veća opterećenja, zbog razlike u promjeru Ku Zhu bambus ima višu prosječnu tlačnu čvrstoću za oko 8 %. Također, vidljiva su odstupanja pri mjerenju. Uzorak 1-A-3T ima čvor te ima tlačnu čvrstoću skoro 78 N/mm^2 (prosjek je 63 N/mm^2). Povećanje tlačne čvrstoće postojanjem čvora iznosi oko 19 % za ovaj uzorak.

3) Savojna čvrstoća

Ispitivanje savijanja provedeno je, nakon izlaganja uzoraka u vlažnim uvjetima, po uzoru na dosad provedena ispitivanja te ispitivanje prema [54] metodom „tri točke“ na uređaju proizvođača: Heckert, tip: WPM, EU 40 MOD, klasa točnosti: 0,5. Ispitano je 6 uzoraka tonkinovog bambusa cijevi broj 3 i 9 te 5 uzoraka Ku Zhu bambusa cijevi broj 22 i 24 pri sobnoj temperaturi uz brzinu 5 mm/min. Uzorci su duljine 200 mm uz različitih promjere. Metodom „tri točke“ uzorak je stavljen na dvije stabilne točke između kojih je razmak $L = 76 \text{ mm}$ te opterećujemo uzorak na $L/2$ sa silom. Dijagram ispitanog uzorka 3-A-1 prikazan je na slici 58. Na slici 59 vidljivo je oštećenje nastalo uslijed opterećenja.



Slika 58. Dijagram za uzorak 3-A-1



Slika 59. Uzorak opterećen na savijanje

Rezultati ispitivanja za tonkinov bambus prikazani su u tablici 20, za Ku Zhu bambus u tablici 21 (l – duljina uzorka [mm], r_0 – vanjski radijus [mm], r_i – unutarnji radijus [mm], d – vanjski promjer [mm], M – moment [Nmm], I – polarni moment inercije [mm⁴], F_m – maksimalna sila [N], σ_s – savojna čvrstoća [N/mm²]).

Tablica 20. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće Tonkin bambusa nakon vlažne komore

Redni broj	Oznaka uzorka	l [mm]	r_0 [mm]	r_i [mm]	F_m [N]	d [mm]	M [Nmm]	I [mm ⁴]	σ_s [N/mm ²]
1.	9-A-1	198	13,25	9,35	1640	26,50	31160,0	18205,1	22,68
2.	9-A-2	196	13,70	8,86	1610	27,40	30590,0	22827,87	18,36
3.	9-B	200	13,22	9,48	1500	26,43	28500,0	17645,78	21,35
Prosjek	→	198	13,39	9,23	1583,3	26,78	30083,33	19559,6	20,80
4.	3-A-1	198	27,48	22,18	3150	54,96	58850,0	257795,2	6,27
5.	3-A-2	196	27,58	22,15	2030	55,16	38570,0	265376,4	4,01
6.	3-B	200	27,60	21,70	2090	55,20	39710,0	281587,4	3,89
Prosjek	→	198	27,55	22,01	2423,3	55,11	45710,0	268252,9	4,72
Ukupan	→	198,00	20,47	15,62	2003,3	40,94	37896,67	143906,3	12,76

Tablica 21. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće Ku Zhu bambusa nakon vlažne komore

Redni broj	Oznaka uzorka	l [mm]	r_0 [mm]	r_i [mm]	F_m [N]	d [mm]	M [Nmm]	I [mm ⁴]	σ_s [N/mm ²]
1.	24-A-1	231	13,25	9,35	2490	22,91	18934	18205,1	13,78
2.	24-A-2	199	13,70	8,86	1880	23,15	15580	22827,8	9,35
3.	24-B	196	13,22	9,48	1500	24,19	22420	17645,7	16,80
Prosjek	→	208,7	13,39	9,23	1956,7	23,42	18978	19559,6	13,31
4.	22-A-1	186	19,75	14,05	2370	39,50	45030	88892,1	10,01
5.	22-A-2	186	19,45	13,60	4100	38,89	77900	85531,8	17,72
Prosjek	→	186	19,60	13,83	3235,0	39,20	61465	87212,1	13,86
Ukupan	→	197,3	16,49	11,53	2595,8	31,31	40221,5	53385,8	13,58

Dobiveni rezultati znatno su niži od rezultata uzoraka koji nisu bili izloženi utjecaju vlage. U ovom se ispitivanju osim utjecaja vlage proučavao i utjecaj promjera na savojnu čvrstoću. Za Tonkinov bambus s prosječnim promjerom oko 27 mm savojna čvrstoća iznosi oko 21 N/mm², a s prosječnim promjerom oko 55 mm iznosi oko 5 N/mm². Pretpostavka je da zbog prevelikog promjera dolazi do poprečnog tlačnog naprezanja te dolazi do loma uzduž uzorka. Ovakav način loma uočen je u literaturi [54]. Na slici 60 je prikazan lom uzorka 3-A-2. Uzimajući u obzir sve podatke iz tablice 20, prosječna savojna čvrstoća Tonkinovog bambusa nakon izlaganja u vlažnim uvjetima u trajanju od 21 dan iznosi oko 13 N/mm².



Slika 60. Lom uzorka 3-A-2

Za Ku Zhu bambus s prosječnim promjerom 23,5mm savojna čvrstoća iznosi oko 13 N/mm^2 , s prosječnim promjerom 39 mm iznosi oko 14 N/mm^2 . U ovom slučaju, nije velika razlika u iznosima prosječne savojne čvrstoće, iako je razlika u promjerima oko 40 %. Stoga se može pretpostaviti da promjer ne djeluje znatno na promjenu iznosa savojne čvrstoće te je u slučaju za Tonkinov bambus kod uzoraka 3-A-1, 3-A-2 i 3-B postignut kritični iznos poprečne tlačne čvrstoće što je rezultiralo lomom. Prema rezultatima, savojna čvrstoća Ku Zhu bambusa nakon izlaganja u vlažnim uvjetima u trajanju od 21 dan iznosi oko 14 N/mm^2 .

5. DISKUSIJA REZULTATA

Provedbom navedenih ispitivanja dobio se uvid u mehanička svojstva i ponašanje dviju vrsta bambusa. Stoga, kako bi se lakše predložili rezultati provedenih ispitivanja, sve prosječne vrijednosti rezultata ispitivanja nalaze se u tablici 22.

Tablica 22. Usporedba provedenih rezultata

Uvjeti ispitivanja	Vrsta bambusa	Vlačna čvrstoća, N/mm ²	Tlačna čvrstoća, N/mm ²	Savojna čvrstoća, N/mm ²	Izvijanje, N/mm ²	Tvrdoća, N/mm ²	Promjena mase, %
Suhi	Tonkin bambus	210,40	78,40	27,81	48,00	32,42	-
	Ku Zhu bambus	193,58	85,99	36,26	-	26,02	-
Vlažni	Tonkin bambus	172,65	63,04	12,76	-	-	+ 0,68
	Ku Zhu bambus	155,34	68,82	13,58	-	-	+ 0,52

Tablica 22 prikazuje usporedbu vrijednosti svojstava prema vrstama bambusa te prema načinu tretiranja.

Vlačna čvrstoća je najvažnije svojstvo za primjenu bambusa. Tonkinov bambus ima za 8 % veću vlačnu čvrstoću nego Ku Zhu bambus. Može se primjetiti pad iznosa vlačne čvrstoće uslijed djelovanja vlage. U slučaju Tonkinovog bambusa pad iznosi 18 %, dok za Ku Zhu iznosi oko 20 % iz čega se zaključuje da djelovanje vlage (relativna vlažnost 65 ± 5 , temperatura $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$) u trajanju od 21 dan smanjuje vlačnu čvrstoću za skoro 1/5 iznosa.

Tlačna čvrstoća Tonkinovog bambusa pokazala se nižom za oko 9 % od tlačne čvrstoće Ku Zhu bambusa. Pad iznosa uslijed djelovanja vlage je prisutan i kod tlačne čvrstoće. Za Tonkinov bambus pad iznosi oko 19 %, za Ku Zhu bambus 20 %. Evidentan je da pad tlačne čvrstoće djelovanjem vlage iznosi 1/5.

Savojna čvrstoća Tonkinovog bambusa niža je za oko 23 % od savojne čvrstoće Ku Zhu bambusa. Značajan je pad savojne čvrstoće uslijed djelovanja vlage, za Tonkinov bambus iznosi 54 %, a za Ku Zhu bambus oko 63 %. Prema tome, utjecaj vlage na bambus značajno šteti savojnoj čvrstoći.

Izvijanje je provedeno samo na uzorcima Tonkinovog bambusa te prosječna vrijednost iznosi 48 N/mm^2 s prosječnom silom izvijanja 26850 N na uzorku duljine 520 mm i vanjskim promjerom 39,77 mm. Uzorak je rezan na dimenzije cijevi sjedala bicikla te prema proračunu

tek pri opterećenju od 2737 kg dolazi do loma cijevi. Iz ovih podataka može se zaključiti da je Tonkinov bambus prikladan kao materijal okvira bicikla.

Tvrdoća je izmjerena na uzorcima koji nisu bili izloženi vlažnim uvjetima. Prema mjerenjima srednja vrijednost tvrdoće nakon 60 sekundi opterećenja je za skoro 20 % veća kod Tonkin bambusa.

Uzorci su vagani prije i nakon izlaganja vlažnim uvjetima te zabilježena je prosječna promjera mase kod Tonkin bambusa za 0,68 % te za 0,52 % kod Ku Zhu bambusa.

❖ USPOREDBA S OSTALIM MATERIJALIMA

Da bi se dobila prava slika provedenih ispitivanja potrebno je usporediti dobivene rezultate bambusa s ostalim materijalima koji se koriste za izradu okvira bicikla. Usporedba vlačne čvrstoće nalazi se u tablici 23 gdje su prikazani materijali, njihov iznos vlačne čvrstoće te izvor podataka. Označeni su rednim brojem koji te poredani su od najvišeg iznosa vlačne čvrstoće prema najnižem. (BV+PE – kompozit s bambus vlaknima i polietilenskom matricom, BV+EP - kompozit s bambus vlaknima i epoksilnom smolom).

Tablica 23. Usporedba vlačne čvrstoće materijala

Broj	Materijal	R_m , N/mm ²	Izvor
1.	Ti6Al4V	950,0	[19]
2.	Čelik 25CrMo4	710,0	[22]
3.	Ugljična vlakna	625,0	[4]
4.	Čelik S275J0	483,9	[64]
5.	Aluminij 7005	350,0	[17]
7.	Tonkin bambus	210,4	Uzorak
6.	Aluminij 6061 T4	206,5	[69]
8.	Ku Zhu bambus	193,6	Uzorak
9.	G-AlSi6Cu4	180,0	[22]
10.	Kalkuta bambus	170,7	[48]
11.	Bambus	168,7	[45]
12.	Moso bambus	153,0	[53]
13.	Magnezijeve legure	150,0	[4]
14.	Zimbabve bambus	148,0	[51]
15.	BV+PE	126,2	[43]
16.	Laminirani moso bambus	90,0	[53]
17.	Smreka	89,0	[51]
18.	BV+EP	86,6	[43]

Uspoređujući iznose vlačne čvrstoće iz tablice, može se zaključiti da primjena bambusa za izradu okvira bicikla je prihvatljiva. Prema očekivanju, vlačna čvrstoća čelika, titanovih legura te kompozita s ugljičnim vlaknima je znatno veća nego vlačna čvrstoća bambusa. Međutim, iznos vlačne čvrstoće Tonkinovog bambusa viši je od iznosa vlačne čvrstoće aluminijske legure 6061 koja je ujedno najzastupljeniji materijal za izradu bicikla. Također, iznosi oba uzorka viši su od magnezijevih legura, G-AlSi6Cu4 aluminijske legure, smreke, kompozita s bambus vlaknima te ostalih ispitivanih vrsta bambusa.

U tablici 24 uspoređeni su iznosi tlačnih čvrstoća različitih materijala gdje su kao i u prethodnoj tablici prikazani materijali, njihov iznos vlačne čvrstoće te izvor podataka.

Tablica 24. Usporedba tlačne čvrstoće materijala

Broj	Materijal	σ_t , N/mm ²	Izvor
1.	Ti6Al4V	964,0	[65]
2.	Aluminij 7005	296,0	[70]
3.	Čelik 25CrMo4	240,0	[66]
4.	Čelik S275J0	152,0	[68]
5.	Aluminij 6061	132,0	[69]
6.	PMMA	125,0	[22]
7.	Bambus	115,8	[52]
8.	Ugljična vlakna	110,0	[67]
9.	Bor	90,0	[22]
10.	Ku Zhu bambus	86,0	Uzorak
11.	PC	82,0	[22]
12.	Tonkin bambus	78,4	Uzorak
13.	Laminirani moso bambus	77,0	[53]
14.	Kao Zhu bambus	70,0	[54]
15.	Bukva	60,0	[22]
16.	Moso bambus	60,0	[54]
17.	Moso bambus	53,0	[49]
18.	Hrast	50,0	[22]

Prema podacima iz tablice može se primjetiti da titanove legure mogu podnijeti mnogo veće opterećenje na tlak nego ostali materijali. Iznosi ispitanih uzoraka imaju nižu vrijednost tlačne čvrstoće nego ostali materijali koji se primjenjuju za izradu bicikl (osim nekih vrsta drva).

Može se zaključiti da uz veću debljinu stijenke cijevi može se nadoknaditi manji iznos tlačne čvrstoće.

Usporedba rezultata za savojnu čvrstoću nalazi se u tablici 25. Ispisani su materijali i njihov iznosi savojne čvrstoće prema izvoru. Poredani su od najvećeg iznosa prema najmanjem.

Tablica 25. Usporedba savojne čvrstoće materijala

Broj	Materijal	σ_s , N/mm ²	Izvor
1.	Ti6Al4V	933,0	[65]
2.	Čelik 25CrMo4	240,0	[66]
3.	Moso bambus	135,0	[49]
4.	PMMA	120,0	[22]
5.	Kao Zhu bambus	109,0	[54]
6.	PC	97,5	[22]
7.	Moso bamboo	97,3	[48]
8.	Moso bambus	85,0	[54]
9.	Calcutta Bamboo	83,2	[48]
10.	Hrast	80,0	[22]
11.	Laminirani moso bambus	80,0	[53]
12.	Guadua bambus	72,6	[37]
13.	Bor	59,0	[48]
14.	Ku Zhu bambus	36,3	Uzorak
15.	Tonkin bambus	27,8	Uzorak
16.	Bambus	4,4	[52]

Rezultati savojne čvrstoće ispitanih uzoraka su prilično niski. Pretpostavka je da rezultati odostupaju zbog nekonvencionalnog provođenja ispitivanja koje je u ovom slučaju bilo nužno zbog realnijeg prikaza rezultata za izradu okvira bicikla. Ispitivanje je provedeno istom metodom kao i ispitivanje [54], ali na različitim promjerima uzoraka. Iznosi savojne čvrstoće bambusa pokazali su se nižim do savojne čvrstoće čelika te titanovih legura.

Usporedba rezultata izvijanja nalaze se u tablici 26 gdje su poredani od najvišeg iznosa prema najnižem.

Tablica 26. Usporedba naprezanja izvijanja materijala

Broj	Materijal	σ_k , N/mm ²	Izvor
1.	Čelik 25CrMo4	153,0	[66]
2.	Čelik S275J0	140,0	[68]
3.	Ti6Al4V	124,9	[65]
4.	Aluminij 6061	68,6	[69]
5.	Tonkin bambus	48,0	Uzorak

Iz tablice se može vidjeti mala prednost čelika nad titanovim legurama, dok je iznos naprezanja izvijanja veći za oko 69 % nego kod Tonkin bambusa. Razlika je 30 % između naprezanja izvijanja Tonkin bambusa i aluminijske legure 6061.

U tablici 27 uspoređene su tvrdoće različitih materijala gdje su kao i u prethodnim tablicama prikazani materijali, njihov iznos vlačne čvrstoće te izvor podataka.

Tablica 27. Usporedba tvrdoće materijala

Broj	Materijal	H_k , N/mm ²	Izvor
1.	Ti6Al4V	3550,0	[65]
2.	Čelik 25CrMo4	1950,0	[66]
3.	Tonkin bambus	32,42	Uzorak
4.	Ku Zhu bambus	26,02	Uzorak

Razlika u tvrdoći materijala je znatna. Titanove legure imaju više od 100 puta veću tvrdoću materijala nego ispitivani bambusi, dok je čelik 25CrMo4 je tvrdi više od 60 puta. No, tvrdoća nije ključan faktor za izradu okvira bicikla.

Usporedba sljedećeg svojstva iako nije ispitivano u ovom radu vrlo je bitna. U tablici 28 su prikazani materijali, njihov iznos gustoće te izvor podataka. Poredani su od najmanjeg prema najvećem iznosu.

Tablica 28. Usporedba gustoće materijala

Broj	Materijal	ρ , kg/m ³	Izvor
1.	Jela	0,550	[22]
2.	Hrast	0,625	[22]
3.	Moso bambus	0,666	[49]
4.	Orah	0,675	[22]
5.	Laminirani moso bambus	0,686	[53]
6.	Kao Zhu bambus	0,709	[54]
7.	Ugljična vlakna	1,800	[19]
8.	Aluminij 6061	2,700	[17]
9.	Aluminij 7005	2,780	[17]
10.	Ti6Al4V	4,430	[19]
11.	Čelik S275J0	7,780	[17]
12.	Čelik 25CrMo4	7,800	[17]

Prema podacima iz literature, pojedine vrste drva ima manju gustoću od bambusa. Bambus ima znatno manju gustoću nego ostali materijali koji se primjenjuju za izradu bicikla čime se može postići manja masa. Prosječna gustoća bambusa je 91 % mana od gustoće čelika, 84,5% od titanovih legura, 75 % mana od aluminijevih legura te 62 % od kompozita s ugljičnim vlaknima. Stoga prema podacima iz literature te uz pretpostavku da je gustoća ispitivanih bambusa 0,686 kg/m³ može se usporediti specifične vlačne čvrstoće materijala u tablici 29.

Tablica 29. Usporedba specifične vlačne čvrstoće materijala

Broj	Materijal	R_m , N/mm ²	Specifična čvrstoća
1.	Ugljična vlakna	625,0	347,2
2.	Tonkin bambus	210,4	306,7
3.	Ku Zhu bambus	193,6	282,2
4.	Moso bambus	153,0	229,7
5.	Ti6Al4V	950,0	214,5
6.	Aluminij 7005	350,0	125,9
7.	Čelik 25CrMo4	710,0	91,0
8.	Aluminij 6061	206,5	76,5
9.	Čelik S275J0	483,9	62,2

Prema podacima iz tablice samo kompoziti s ugljičnim vlaknima imaju prednost nad bambusom. Tonkinov bambus ima 80 % veću specifičnu vlačnu čvrstoću nego čelik S275J0, 75 % veću nego Al 6061 te 30 % veću nego titanova legura Ti6Al4V. Specifična vlačna

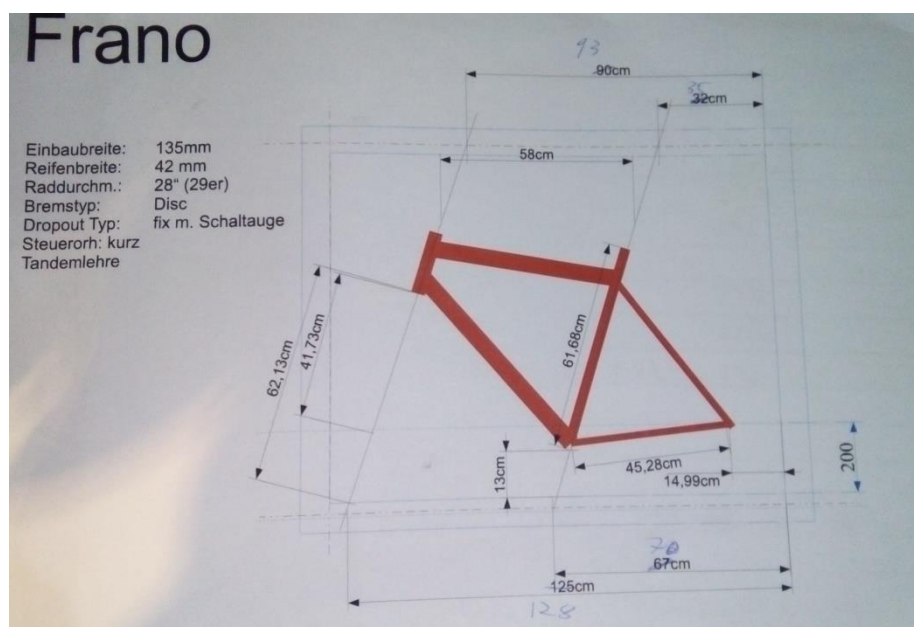
čvrstoća je najvažnije svojstvo te ujedno i najveća prednost primjene bambusa, uz cijenu i ekološku prihvatljivost.

6. IZRADA BIKIKLA

Okvir bicikla se izradio u tvrtki Bambooride u Beču. Izrada se provela u tri faze :

- Određivanja geometrije i izbor materijala
- Izrada okvira
- Završna obrada

Geometrija okvira bicikla određena je po vozaču visokom 185 cm te tipu bicikla. Izabrani su kutevi i duljine po uzoru na geometriju turing bicikla te skicirani. Skica okvira prikazana na slici 61.



Slika 61. Skica okvira

Nakon određivanja geometrije, priprema se naprava (eng. *jig*) i izabran je materijal. Nakon pomnog odabira cijevi bambusa te detaljne inspekcije kreće rezanje cijevi na zadane dimenzije. Sljedeća faza je izrada okvira. Započinje s obradom rubnih dijelova cijevi kako bi se spojevi što bolje poklopili. Nakon obrade cijevi se postavljaju se pod zadanim kutom na napravo gdje se spajaju mješavinom drvenih čestica i brzосуšeće 2-komponentne epoksilne smole (eng. *five minute epoxy*) kako bi spojevi bili dovoljno čvrsti za sljedeći korak izrade. Postavljanje na napravo i spajanje dijelova vidljivo na slikama 62 i 63.



Slika 62. Postavljanje cijevi na napravo



Slika 63. Lijepljenje spojeva

Nakon nekoliko sati lijepljeni spoj očvrstne, zatim se stavlja zaštitna folija na sve dijelove osim spojeva na koje se ručno namotava prepreg ugljičnih vlakana. Prepreg se premazuje dvokomponentnom epoksilnom smolom te se nanosi na spojeve kako bi se povećala čvrstoća spojeva. Namotavanje se radi u svim smjerovima zbog anizotropskih svojstava ugljičnih vlakana. Postavlja se tri do četiri sloja preprega ugljičnih vlakana te jedan završni u estetske svrhe. Nakon što je postavljanje kompozita s ugljičnim vlaknima gotovo postavlja se zaštitna traka preko novonastalog kompozita kako bi se istisnuo višak smole što je i prikazano na slici 64.



Slika 64. Nanošenje trake na kompozit s ugljičnim vlaknima

Okvir se suši na zraku u trajanju od 12 sati kako bi epoksilna smola očvrstnula. Posljednja faza izrade okvira je završna obrada i zaštita materijala. Bruse se spojevi i skida se višak vlakana i smole, zatim se skida površinski sloj bambusa kako bi se zaštitni premaz bolje prihvatio. Neobrađeni spoj prikazan na slici 65.



Slika 65. Okvir od bambusa

Nanosí zaštitni sloj (lak za brodove) na okvir kako bi se zaštitio od djelovanja vlage. Prikaz nanošenja zaštitnog sloja nalazi se na slici 66. Okvir se suši 90 minuta nakon čega se pregledava. Izmjerena je masa okvira 2,65 kg. Izrađeni okvir bicikla nalazi se na slici 67.



Slika 66. Nanošenje zaštitnog sloja na okvir



Slika 67. Izrađeni okvir od bambusa i ugljičnih vlakana

7. ZAKLJUČAK

Suvremeni način razmišljanja uvjerio nas je da povratak „primitivnim“ materijalima rješenje za održivu budućnost. Jedan od tih materijala je i bambus koji se pokazao kao vrlo pogodan materijal iz ekonomskog, ekološkog i sociološkog aspekta. U ovo radu opisana je primjena materijala kod bicikla, zatim je objašnjena podjela bambusa, struktura koja je proučavana pod skenirajućim elektronskim mikroskopom, kemijski sastav te mehanička svojstva koja su ispitivana i uspoređena s ostalim materijalima. Otkriven je potencijal i prilika za nova ispitivanja koja će pridonijeti znanosti za razumijevanje bambusa kao konstrukcijskog materijala. Podaci dobiveni iz ovog rada su jedinstveni te vrlo važni za shvaćanje i klasificiranje svojstava Tonkin bambusa i Ku Zhu bambusa.

Potvrdile su se pretpostavke da se mehanička svojstva razlikuju među vrstama bambusa. Ove vrste bambusa pokazale su odličnu specifičnu vlačnu čvrstoću, vrlo dobru vlačnu čvrstoću i dobru tlačnu čvrstoću u odnosu na ostale materijale koji se primjenjuju kod izrade bicikla dok svojstva izvijanja, savojne čvrstoće i tvrdoće su se pokazala nižim.

Zaključuje se da se izborom bambusa za izradu okvira bicikla može, uz smanjenje emisije CO₂, troškova i mase bicikla, zadržati dobra mehanička svojstva.

LITERATURA

- [1] Penava, F., Primjena prirodnih materijala u vozilima, završni rad, Fakultet Strojarsstva i Brodogradnje, Zagreb, 2014,
- [2] http://www.conebi.eu/?page_id=154 [12.04.2016.]
- [3] Kresonja, J., Biciklistički priručnik, 2011
- http://www.na2kotaca.net/wp-content/uploads/2014/12/biciklisti%C4%8Dki_priru%C4%8Dnik_HBS_izdanje.pdf [12.04.2016.]
- [4] Van der Plas, R., Baird, S.: Bicycle Technology, Cycle Publishing, San Francisco 2010,
- [5] Haine, C.: The Urban Biking Handbook: The DIY Guide to Building, Rebuilding, Tinkering with, and Repairing Your Bicycle for City Living.
- [6] <http://www.biker.hr/naslovnica/vijesti/bicikl-i-sastavni-dijelovi.html> [12.04.2016.]
- [7] <http://rusbicycles.co.uk/wp-content/uploads/2013/05/jakes-handmade-steel-bike-frame.jpg> ; [13.04.2016.]
- [8] <http://www.bike.bikegremlin.com/wp-content/uploads/2015/07/Drivetrain-parts.png> [14.04.2016.]
- [9] <http://bikebooboos.com/files/2012/09/Rim-brake-adjust.png> [14.04.2016.]
- [10] https://usercontent1.hubstatic.com/7130214_f520.jpg [14.04.2016.]
- [11] Wilkinson M., Bicycle Frame Building in the USA, Winston Churchill Travelling fellow, 2011
- [12] <http://bike.shimano.com/content/sac-bike/en/home/news-and-info/news/metrea-new-style-for-urban-sports-riders.html> [15.04.2016.]
- [13] http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/general_interest/sport_mins/bicycle.pdf [15.04.2016.]
- [14] http://1.bp.blogspot.com/_urSQL6wUA5g/SROFF-rwVeI/AAAAAAAAAFV4/RnUYgWLHMJc/s400/bicycle+frame+forces.JPG [15.04.2016.]

- [15] <https://www.wilcodirect.co.uk/blog/wp-content/uploads/2014/01/bike-geometry-explained.jpg> [15.04.2016.]
- [16] http://www.stc-orlando.org/education/highsch/winning_entries/2009_abourne.pdf [15.04.2016.]
- [17] Dwyer, F; Shaw, A.; Tombarelli R.; Material and Design Optimization for an Aluminum Bike Frame, Worcester Polytechnic Institute, Degree of Bachelor of Science Thesis, Travanj 2012
- [18] Colins, P., A brief history and future of materials in the cycling industry, School of Engineering, Deakin University, Bicycle Materials Australia Vol 46, Br.2, Lipanj 2013
- [19] C. Rontescu, T. D. Cicic, C. G. Amza, O. Chivu, D. Dobrotă, Choosing The Optimum Material For Making A Bicycle Frame, METABK 54(4), 679-682, 2015
- [20] http://www.bikeoff.org/design_resource/dr_PDF/materials.pdf [17.04.2016.]
- [21] <http://www.adventurecycling.org/default/assets/resources/framematerials.pdf> [17.04.2016.]
- [22] Filetin, T.; Kovačiček, F. and Indof, J.: Svojstva i primjena, Fakultet Strojарstva i Brodogradnje, Zagreb, 2007
- [23] <https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTUaCLFwlv7GzEez93ufvXIcNYhd4gmY9N6RMUbKMsCfGPHJgplVA> [17.04.2016.]
- [24] <http://www.pcoatings-tech.com/pdf/Magnesium.pdf> [17.04.2016.]
- [25] http://upload.ecvv.com/upload/Product/20092/China_carbon_bike_frame20092314474110.jpg [17.04.2016.]
- [26] <http://www.amsterdo.com/commune-with-nature-on-a-beautiful-wooden-bicycle-bough-bikes/>; [21.04.2016.]
- [27] <http://www.muzzicycles.com.br/muzzicycles-English/PaginasInternas/caracteristicas/demo/index.html>; [21.04.2016.]
- [28] <http://www.onyx-composites.de/forschung-und-entwicklung/hanfbike/>; [21.04.2016.]
- [29] <http://www.cardboardtech.com/>; [21.04.2016.]
- [30] <https://cnet1.cbsistatic.com/hub/i/r/2013/06/25/77c210fc-fdb5-11e2-8c7c-d4ae52e62bcc/resize/570xauto/97518017513b514ec2d748784f56c032/cardboardbike1.jpeg>; [21.04.2016.]

- [31] <http://deadfix.com/wp-content/uploads/2011/09/natural.jpg> ; [21.04.2016.]
- [32] Bystriakova, N.; Kapos, V., Bamboo diversity: the need for a Red List review; Biodiversity 6 (4), 21-16, 2006,
- [33] Esteve-Sendra, C.; Moreno-Cuesta, R.; Portales-Mananos, A. and Magal-Royo, T., Bamboo, from Traditional Crafts to Contemporary Design and Architecture, Procedia – Social and Behavioral Sciences 51, 777-781, 2012
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.08.239>,
- [34] <http://i2.cdn.turner.com/cnnnext/dam/assets/140807210033-1-sagano-bamboo-forest-horizontal-large-gallery.jpg> ; [22.04.2016.]
- [35] <http://www.bamboogarden.com/F-robusta-09.jpg> ; [22.04.2016.]
- [36] Scurlock J.M.O, Dayton D.C, Hames B, Bamboo: an overlooked biomass resource?, Biomass and Bioenergy 2000, 19, 229 do 244
- [37] Liese, W.; Köhl, M., Bamboo – The Plant and its Uses, University of Hamburg, Tropical Forestry, ISBN 978-3-319-14133-6, Siječanj 2015
- [38] <http://www.mastergardenproducts.com/bigbamboopanel8.jpg> ; [22.04.2016.]
- [39] <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/84/af/be/84afbebc020c93fa0948a3406381528d.jpg> ; [22.04.2016.]
- [40] Stapleton, C.M.A., The morphology of woody bamboos, Royal Botanic Gardens, The Bamboos:251-267, 1997
- [41] <https://jessegarden.files.wordpress.com/2012/09/clumping-bamboo-root-structure.jpg> [24.04.2016.]
- [42] <https://jessegarden.files.wordpress.com/2012/09/running-bamboo-root-structure.jpg> [24.04.2016.]
- [43] Khalil A, Bhat I.U.H , Jawaid M, Zaidon A, Hermawan D, Hadi Y.S, Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review, Materials and Design 2012, 42, 353 do 369
- [44] Wolfram Schott, Bamboo in the Laboratory, Studeni 2006
- [45] Zhou Aiping, Huang Dongsheng, Li Haitao, Su Yi, Hybrid approach to determine the mechanical parameters of fibers and matrixes of bamboo, Construction and Building Materials 35 (2012) 191–196
- [46] T. Tan, N. Rahbar, S.M. Allameh, S. Kwofie, D. Dissmore, K. Ghavami, W.O. Soboyejo, Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures, Acta Biomaterialia 7 (2011) 3796–3803
- [47] Janssen, J.A., Bamboo research at the Eindhoven University of Technology, Eindhoven 1990

- [48] Ahmad, M. and Kamke, F.A., Mechanical Properties of Calcutta Bamboo. Ph.D. Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, poglavlje 4, 2000,
<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08212000-10440027>
- [49] Bhavna Sharma, Gatóo, A., Michael H. Ramage, Effect of processing methods on the mechanical properties of engineered bamboo, *Construction and Building Materials* 83 (2015) 95–101
- [50] Michael R.G., Microstructure and mechanical properties of bamboo in compression, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Bachelor Thesis, Lipanj 2012
- [51] T. Gutu, A Study on the Mechanical Strength Properties of Bamboo to Enhance Its Diversification on Its Utilization, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)* ISSN: 2278-3075, Volume-2, Issue-5, Travanj 2013
- [52] Cyril Okhio Ph.D., C.Eng.; Jeroen Waning, B.Sc.; Yemeserach T. Mekonnen, B.Sc., An Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Bamboo and Cane, *Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Bioengineering (JSAB)*, Rujan 2011
- [53] Bhavna Sharma, Ana Gatóo, Maximilian Bock, Michael Ramage, Engineered bamboo for structural applications, *Construction and Building Materials* 81 (2015) 66–73
- [54] K.F. Chung *, W.K. Yu, Mechanical properties of structural bamboo for bamboo Scaffoldings, *Engineering Structures* 24 (2002) 429–442
- [55] Tommy Y. Lo*, H.Z. Cui, H.C. Leung, The effect of fiber density on strength capacity of bamboo, *Materials Letters* 58 (2004) 2595– 2598
- [56] <http://www.ars-grin.gov/cgi-bin/npgs/html/taxon.pl?402515> ; [28.04.2016.]
- [57] <http://davesgarden.com/guides/pf/go/144786/#ixzz3luItkoKx> ; [28.04.2016.]
- [58] http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200026090 ; [28.04.2016.]
- [59] http://bamboosourcery.com/cat_frame.cfm?sec=2&row=1&part=2 ; [28.04.2016.]
- [60] http://www.backyardgardener.com/plantname/pda_ce95.html ; [28.04.2016.]
- [61] <http://www.onlineplantguide.com/Plant-Details/2036/> ; [28.04.2016.]
- [62] http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200025958 ; [29.04.2016.]
- [63] http://www.backyardgardener.com/plantname/pda_17b0-2.html ; [29.04.2016.]
- [64] Alar, Z.; Mandic, D.; Dugorepec, A. and Sakoman, M., Application of Instrumented Charpy Method in Characterisation of Materials
Interdisciplinary Description of Complex Systems **13**(3), 479-487, 2015,

<http://dx.doi.org/10.7906/indecs.13.3.12>

[65] <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1547> ; [29.04.2016.]

[66] <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=863> ; [29.04.2016.]

[67] http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp ;
[28.04.2016.]

[68]

<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=d1844977c5c8440cb9a3a967f8909c3a&ckck=1> ; [29.04.2016.]

[69] <http://www.grantadesign.com/education/datasheets/alumlevel3.htm> ; [03.05.2016.]

[70]

https://books.google.hr/books?id=_iUd4RskarMC&pg=PA215&lpg=PA215&dq=flexural+strength+7005+al&source=bl&ots=6Fxdff9P_&sig=npuYGgJmiJ27R54si5kJPQYk6IQ&hl=hr&sa=X&ved=0ahUKEwiJzMmmwbnMAhXEhSwKHYYTxC3YQ6AEIWzAI#v=onepage&q=flexural%20strength%207005%20al&f=false ; [03.05.2016.]